ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 1
BIMESTRIEL

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

AVIS AUX LECTEURS

Les Annales publiées par l'I. N. R. A. comportent les huit séries suivantes :

ANNALES AGRONOMIQUES. — Agronomie générale et science du sol. — 6 fascicules par an.

ANNALES DE PHYSIOLOGIE VÉGÉTALE. — 4 fascicules par an.

ANNALES DE L'AMÉLIORATION DES PLANTES. — 4 fascicules par an.

ANNALES DES ÉPIPHYTIES. — Pathologie végétale, zoologie agricole, phytopharmacie. — 4 fascicules par an.

ANNALES DE L'ABEILLE. — 4 fascicules par an.

ANNALES DE ZOOTECHNIE. — 4 fascicules par an.

ANNALES DE TECHNOLOGIE AGRICOLE. — 4 fascicules par an.

ANNALES DE BIOLOGIE ANIMALE, BIOCHIMIE, BIOPHYSIQUE. — 4 fascicules par an.

AUTRES PUBLICATIONS RÉCENTES de l'I. N. R. A.

Compte rendu du colloque sur « le problème des oiseaux sur les aérodromes ». Nice, 25-27 novembre 1964, par **R. G. Busnel** et **J. Giban :**

40,00 F : Franco 42,00 F

Les maladies des plantes maraîchères. Volume II, par **C. M. Messiaen et R. Lafon.**

176 p., 57 fig., 1965 ..... **25,00 F : Franco 26,00 F**

La classification des minéraux argileux, par **G. Pedro.**

108 p., 1965 ..... **22,00 F : Franco 23,00 F**

Identification d'une nouvelle maladie à virus de la vigne, « la flavescence dorée ». Étude des phénomènes de localisation des symptômes et de rétablissement.

193 p., 1965 ..... **24,00 F : Franco 25,00 F**

Les variétés d'Avoine cultivées en France, par **C. Moule.**

404 p., 1964 ..... **50,00 F : Franco 53,00 F**

L'eau et la production végétale.

450 p., 1963 ..... **38,00 F : Franco 40,00 F**

Contribution à l'étude du Quaternaire récent de la Grande Limagne marno-calcaire : morphogenèse et pédogenèse, par **L. Gachon.**

191 p., 1963 ..... **22,00 F : Franco 23,00 F**

Premier colloque international sur la culture de tissus des Invertébrés Montpellier, 22-24 octobre 1962, par **C. Vago.**

222 p., 1963 ..... **40,00 F : Franco 42,00 F**

Les maladies des plantes maraîchères. Volume I, par **C. M. Messiaen et R. Lafon.**

153 p., 57 fig., 1963 ..... **20,00 F : Franco 21,00**

Étude écologique du développement nymphal de deux Diptères Muscides phytophages : *Pegomyia betae* Curtis et *Chortophila brassicae* Bouché, par **J. Missonnier.**

185 p., 1963 ..... **22,00 F : Franco 23,00 F**

Symposium International d'Œnologie, Bordeaux, 10-15 juin 1963.

434 p., 1963 ..... **45,00 F : Franco 47,00 F**

Les commandes doivent être adressées au Service des Publications de l'Institut national de la Recherche agronomique, route de Saint-Cyr, Versailles.

Règlement : par chèque bancaire à l'ordre du Régisseur des Publications, par virement postal à son compte courant : Paris 9064-43 sans mentionner d'adresse ou par bons U.N.E.S.C.O.

Les demandes peuvent être souscrites également par l'intermédiaire des libraires dans les conditions habituelles.

A Paris, bureau de vente, 149, rue de Grenelle.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE
CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL
CENTRE DE GRIGNON

ANNALES AGRONOMIQUES

VOLUME 16
1965

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 1

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Ann. agron., 1965, **16** (1), 5-23.

MODALITÉS D'UTILISATION EN AGRONOMIE D'UN HUMIDIMÈTRE A RALENTISSEMENT DE NEUTRONS

C. MAERTENS (1), J. MORIZET et R. STUDER

Station agronomique, Châteauroux (Indre)

SOMMAIRE

Les différents aspects suivants, d'utilisation agronomique de l'humidimètre à neutrons ont été étudiés :

— Étalonnage à partir de différents sols en place et à différentes humidités.

— Intervention des sphères d'influence sur les mesures dans les tranches supérieures des sols et dans le cas de plusieurs horizons d'humidité différente.

— Influence de la présence de l'eau libre dans les sols.

Quelques exemples d'utilisation montrent les possibilités de cet appareil.

INTRODUCTION

La consommation de l'eau par les cultures est, parmi les facteurs de production, l'un des plus importants. La connaissance de la participation du sol à l'alimentation hydrique des végétaux, en dehors de tout apport extérieur, est nécessaire pour le calcul des doses d'irrigation, ainsi que pour la détermination des aptitudes culturales (choix des espèces et variétés, densité de semis, etc.).

Les réserves théoriquement utilisables peuvent être déterminées par des méthodes de laboratoire ; pour les réserves réellement utilisées il faut avoir recours aux profils hydriques. La méthode des sondages présente cependant une part d'imprécisions dues à l'hétérogénéité des taux d'humidité à petite échelle (HANKS et BOWERS, 1960). De plus, pour l'établissement de bilans hydriques, il faut transformer l'humidité pondérale ainsi obtenue en humidité volumique, à l'aide de la densité apparente, elle-même très variable.

Il existe depuis une dizaine d'années des humidimètres à ralentissement de neutrons, qui mesurent directement le taux d'humidité volumique et présentent l'avantage de permettre d'opérer toujours au même endroit.

(1) Adresse actuelle : Station d'Agronomie, Toulouse.

La majorité des études concernant l'étalonnage, la précision et la fidélité de ce genre d'appareils ont été réalisées en laboratoire. Leurs auteurs travaillent sur des milieux homogènes contenus dans de grands récipients (VAN BAVEL et *al.*, 1956 ; ANDRIEUX et *al.*, 1962 ; DAMAGNEZ, 1962 ; DE BOODT et *al.*, 1963). Il n'existe que très peu de données précises concernant le comportement de ces humidimètres dans les milieux hétérogènes que représente la succession des différents horizons d'un profil. C'est pourquoi nous avons jugé utile de déterminer les limites d'utilisation, et la précision sur le terrain pour différents types de sols. La confirmation des données ainsi recueillies a cependant nécessité des manipulations en laboratoire.

Nous exposerons successivement :

— un bref rappel du fonctionnement de l'appareil ;

— les essais effectués pour préciser ce fonctionnement (étalonnage, étude des sphères d'influence, effet de l'eau libre), et les limites d'utilisation ;

— quelques exemples de résultats obtenus.

I. — RAPPEL DU FONCTIONNEMENT DE L'APPAREIL (ANDRIEUX ET AL., 1962)

1° *Principe de fonctionnement*

Le principe de mesure consiste à envoyer dans le milieu étudié un nombre constant de neutrons rapides qui sont ralentis, jusqu'à l'agitation thermique, par chocs successifs sur les noyaux des différents atomes. La densité des neutrons thermiques est mesurée par un détecteur.

Le ralentissement est d'autant plus important que les masses du noyau rencontré et du neutron ont des valeurs plus proches. L'hydrogène a donc le plus fort coefficient de ralentissement. De plus, il présente la section efficace de ralentissement la plus grande. C'est pourquoi l'eau du sol étant la principale source d'hydrogène, la densité des neutrons thermiques est pratiquement fonction du taux d'humidité.

95 p. 100 des neutrons thermiques se répartissent dans une sphère (sphère d'influence) dont le volume est inversement proportionnel au nombre de molécules d'eau par unité de volume de sol c'est-à-dire au taux d'humidité volumique.

Le rayon de cette sphère est donné par l'équation :

$$R\ cm = 15\sqrt[3]{\frac{100}{H_v}} \qquad \text{(VAN BAVEL et } al.\text{, 1956)}$$

15 étant le rayon de la sphère dans l'eau (pour une source de Ra Be).
Hv le pourcentage d'humidité volumique.

2° *Type d'appareil utilisé*

Tous les types d'appareil sont constitués d'une sonde, comprenant la source de neutrons, et un détecteur de neutrons thermiques relié par l'intermédiaire d'un câble à un intégrateur mesurant le nombre d'impulsions. Pour effectuer les mesures, la sonde est dégagée du corps de l'appareil et est introduite dans un tube en alliage d'aluminium enfoncé en permanence dans le sol. La forme de la courbe (rectiligne en curvilinéaire) reliant l'humidité volumique (Hv) au nombre d'impulsions (ip.) dépend principalement de la position de la source par rapport au centre du détecteur ainsi que de la dimension de ce dernier (HOLMES, 1956), la pente de la courbe étant fonction de l'intensité de la source.

Nous avons utilisé l'appareil de fabrication C.S.F. mis au point par le C.E.A., ayant une source de 5 mCi (Radium Béryllium) placée contre la paroi du détecteur en sa partie médiane. La courbe représentative de la fonction reliant les Is à Hv, pour un sol donné, peut être assimilée à une droite (ANDRIEUX et *al.*; 1962; DAMAGNEZ, 1962 ; DE BOODT et *al.*, 1963).

II. — ESSAIS EFFECTUÉS

1° Étalonnage

a) *Données générales*

L'humidimètre C.S.F. utilisé est fourni avec une courbe d'étalonnage réalisée à partir de mélanges variables de sable et d'alun, le point 0 p. 100 étant obtenu dans le sable pur et le point 100 p. 100 dans l'eau (Andrieux et *al.*, 1962).

Des éléments autres que l'hydrogène, le chlore et le bore en particulier (Van Bavel, 1961 ; Damagnez, 1962), peuvent avoir une certaine influence par leur pouvoir de captation. Bien que leur teneur présente d'un sol à l'autre moins de variation que l'eau, nous avons entrepris un étalonnage sur différents sols en place.

L'étalonnage sur le terrain présente de nombreuses difficultés, dues principalement :

— A la grande hétérogénéité à petite échelle de l'humidité du sol. Nous avons souvent observé des écarts de 4 p. 100 en valeur absolue entre des prélèvements espacés de 20 cm. De son côté, Hanks (1960) a constaté de grands écarts d'humidité en faisant, sur un plan horizontal, des prélèvements rapprochés.

Espace entre les mesures :

	0 cm	3 cm	7 cm	15 cm	31 cm
H %	13,5	12,2	20,1	17,6	16,1

— A la présence d'eau de constitution des minéraux que l'humidimètre mesure au même titre que l'humidité dosable à 105°.

— A la nécessité d'utiliser la densité apparente pour transformer l'humidité pondérale en humidité volumique.

— Aux différences de volume de sol intéressées pour les deux types de mesures.

De simples sondages à partir desquels on obtient l'humidité pondérale sont insuffisants pour l'étalonnage de l'humidimètre à neutrons. C'est pourquoi nous avons utilisé une méthode plus précise.

b) *Technique utilisée*

1° On exécute un sondage à l'aide d'une tarière dont le diamètre est égal à celui du tube d'aluminium qu'on y enfoncera, et on procède aux mesures à l'aide de l'humidimètre.

2° On ouvre ensuite une fosse dont l'une des parois se trouve à environ 10 cm du tube. A un endroit où les données de l'appareil sont constantes sur une profondeur suffisante, on pratique tout autour du tube, et par rafraîchissements successifs, un certain nombre de prélèvements (autant que possible, 4 ou 5) à l'aide de cylindres de volume connu (technique de mesure de la densité apparente de Bryssine, 1953).

3° A partir de ces prélèvements, on calcule directement l'humidité volumique, en divisant le poids correspondant à la perte d'eau à 105° par le volume du cylindre.

4° D'après Damagnez (1962), le nombre d'impulsions lues suit la loi suivante : $N = N_o + K\rho\,(Hp + Hpa)$

N : nombre d'impulsions,

N_o : bruit de fond,

ρ : densité apparente sèche,

Hp : taux d'humidité pondérale à 105°,

Hpa : équivalent en humidité pondérale des atomes d'hydrogène résiduels, représenté essentiellement dans nos prélèvements par l'eau de constitution des minéraux argileux.

C'est pourquoi il convient d'ajouter à l'humidité volumique déterminée à 105° (Hv = ρHp) l'eau de constitution volumique (Hva = ρHpa) obtenue au four à 1 000°.

Nous avons fait la moyenne des quatre ou cinq échantillons afin d'opérer sur plusieurs données situées dans la sphère de mesures de l'humidimètre. La déviation standard attachée à ces moyennes est de l'ordre de 2 p. 100.

b) *Résultats*

Nous avons effectué l'étalonnage de l'humidimètre sur des types de sols de granulométries différentes, renfermant des humidités volumiques allant de 3 à 60 p. 100 (tabl. 1).

TABLEAU I

Granulométrie et humidité des sols ayant servi à l'étalonnage de l'humidimètre

Sol n°	Profondeur (cm)	Fractions granulométriques en μ, % de sol					Humidité volumique		
		< 2	2 à 20	20 à 50	50 à 200	200 à 2 000	Hv	Hva	Hv+Hva
1	70 80 95	0	0	0	2,0	98,0	15,8 15,7 14,8	2,9 3,0 2,4	18,7 18,7 17,2
2	30	1,0	5,5	3,0	17,0	73,0	2,4	1,1	3,5
3	30-35	12,0	15,0	11,5	34,0	25,0	16,5	3,2	19,7
4	50	29,0	16,0	11,0	11,5	29,0	31,3	4,2	35,5
5	60 65 70	34,0	33,0	22,0	7,0	3,0	48,2 39,0 36,3	7,7 8,1 8,2	45,9 47,1 44,5
6	70-75 75-80	36,0	12,0	7,5	11,5	29,5	30,0 28,0	7,7 7,6	37,7 35,7
7	55 60	45,5	12,5	6,0	12,0	21,0	35,6 34,6	11,6 11,7	47,1 46,3
8	70 75	78,0	6,0	6,0	4,0	4,0	52,6 50,9	10,0 10,5	62,6 61,4

A partir de ces 15 mesures recoupant des sols de granulométries très diverses et observés à des humidités inférieures à la capacité au champ, nous avons établi une courbe d'étalonnage (graph. 1). En abscisse sont reportées les données de l'humidimètre sous la forme d'un indice K tel que :

$$K = \frac{\text{nombre d'impulsions/seconde dans le sol (ips)}}{\text{nombre d'impulsions/seconde dans l'étui (ips} - t).}$$

Il est préférable d'utiliser cet indice plutôt que le nombre d'impulsions, afin d'éliminer les variations inhérentes au fonctionnement de l'appareil.

En ordonnées, sont représentées les humidités volumiques absolues, $Hv + Hva$, obtenues par la méthode décrite ci-dessus.

Comme on peut l'observer sur ce graphique, l'alignement des différents points est très satisfaisant. La droite d'étalonnage obtenue à partir de ces sols en place

représente une corrélation hautement significative ($r = 0{,}991$), dont l'équation

$$Hv + Hva = 39\ K - 2{,}1$$

est très proche de l'équation de la droite dans l'alun :

$$Hv = 42\ K - 4{,}2.$$

Il semble donc que la droite d'étalonnage fournie avec l'appareil puisse servir

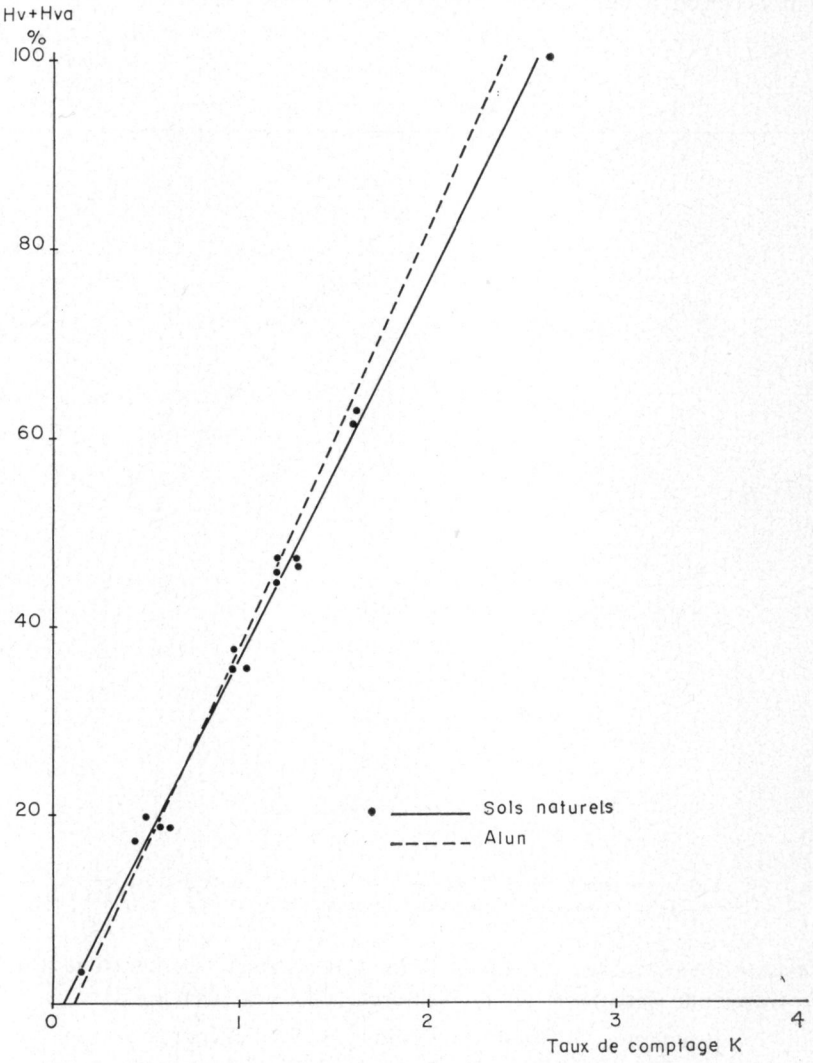


FIG. 1. — *Courbes d'étalonnage dans les sols naturels et dans l'alun*

à estimer l'humidité absolue ($Hv + Hva$) avec une précision suffisante (pour ce calcul, nous n'avons pas tenu compte du point dans l'eau qui est situé un peu au-dessus de la droite).

2° Étude de la sphère d'influence

a) *Données générales*

Suivant le principe de fonctionnement de l'appareil, le rayon de la sphère d'influence varie selon le taux d'humidité. Il est donc très important de connaître la portion de sol qui influence le taux de comptage (K), pour déterminer le crédit que l'on peut accorder à une mesure faite en un endroit précis.

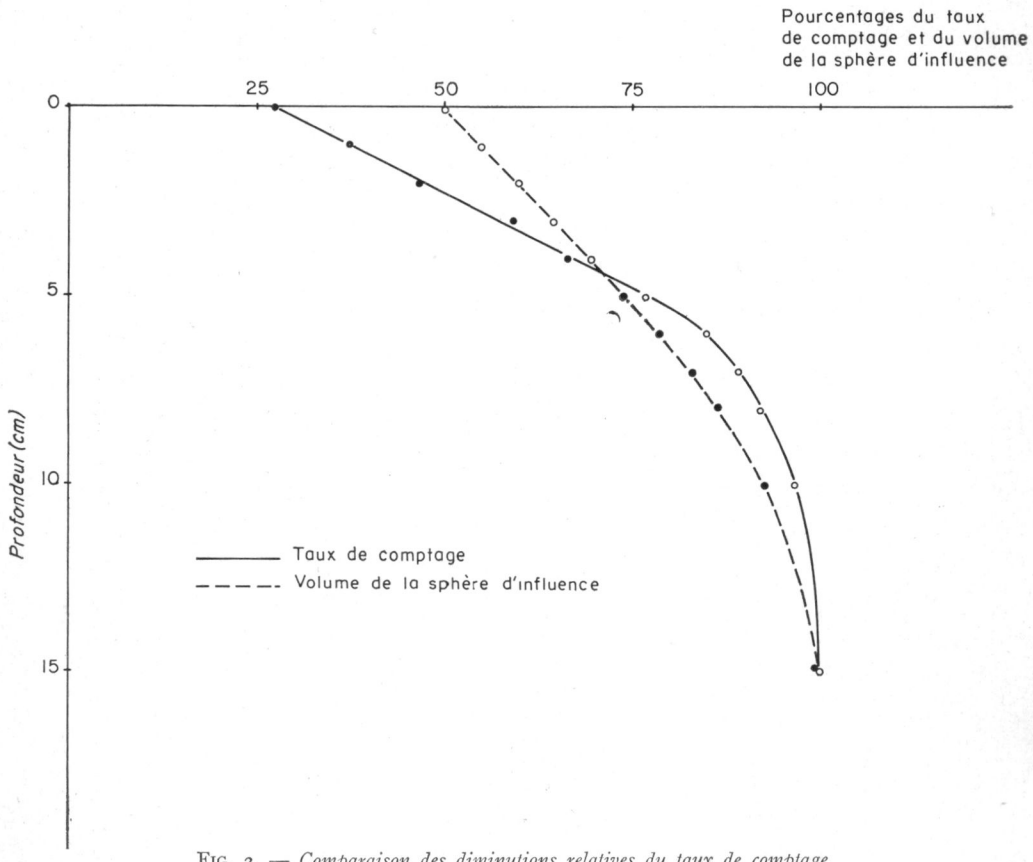


Fig. 2. — *Comparaison des diminutions relatives du taux de comptage et du volume de la sphère d'influence dans l'eau quand on remonte la sonde à la surface*

Ce taux de comptage, directement lié à la quantité de neutrons thermiques venant frapper le détecteur, est la résultante de deux phénomènes :

le volume de la sphère d'influence (Van Bavel, 1956) ;
la répartition des neutrons lents à l'intérieur de la sphère.

Ces phénomènes peuvent être mis en évidence expérimentalement en élevant progressivement, vers la surface, une sonde plongée dans l'eau et en notant pour chaque profondeur le taux de comptage de l'appareil et le volume de la sphère d'influence restant dans l'eau. Il est ainsi possible de comparer deux courbes (graph. 2)

— la première traduit le pourcentage des taux de comptage à diverses profondeurs en fonction du taux de comptage maximal dans l'eau ;

— la seconde indique le pourcentage du volume de la sphère d'influence restant dans l'eau au fur et à mesure de la remontée de la sonde.

Si les neutrons thermiques étaient répartis uniformément dans la sphère d'influence et s'ils impressionnaient, tous, le détecteur d'une façon identique, les deux courbes seraient superposées. En fait, il n'en est rien. Entre 15 et 5 cm de profondeur, le pourcentage le plus élevé est celui du taux de comptage ; ceci résulte, semble-t-il, de la densité plus forte des neutrons thermiques près de la source et de l'action plus grande des neutrons proches du détecteur (VAN BAVEL, 1956). Au contraire, entre 5 cm et la surface, le pourcentage du taux de comptage devient inférieur à celui du volume. On peut invoquer ici la proximité de l'air dans lequel une partie des neutrons thermiques s'échappent et la diminution corrélative de leur densité à l'intérieur de l'eau.

D'autre part, les variations du taux de comptage avec la profondeur sont très différentes selon que l'on passe :

— d'un milieu humide à l'air

— d'un milieu ayant une humidité donnée à un milieu ayant une autre humidité.

Dans le premier cas, les neutrons lents qui sont passés dans l'air sont, en grande majorité, perdus définitivement.

Dans le second, au contraire, il peut y avoir un échange de neutrons par diffusion entre les deux milieux.

b) *Techniques utilisées*

La sonde introduite dans un tube d'aluminium (Duralinox A — G3 × 616 — 41 × 45 mm) plongeant dans des milieux d'humidités différentes est remontée progressivement depuis une profondeur correspondant au moins au rayon de la sphère d'influence ; il est également très important que la profondeur du récipient soit supérieure au double du rayon de la sphère d'influence et que son rayon lui soit au moins égal. C'est pourquoi, pour les plus fortes humidités, nous avons utilisé des fûts en bois de un mètre de profondeur et de vingt-cinq centimètres de rayon, et, pour les plus faibles, nous avons ouvert une fosse de un mètre sur un mètre, dans laquelle la terre prélevée était réintroduite après homogénéisation. Les différentes courbes ont été obtenues avec les milieux suivants :

eau,
gravier de quartz saturé d'eau,
sable grossier saturé d'eau,
terreau plus ou moins humide.

c) *Résultats*

1. *Influence de la profondeur sur le taux de comptage, matériau humide-air.*

Les essais effectués dans un milieu d'humidité homogène ont pour but de préciser la profondeur pour laquelle une mesure est affectée d'une erreur donnée. C'est pourquoi nous avons construit quatre courbes (une pour chacun des matériaux indiqués) donnant le taux de comptage selon la profondeur (graph. 3). Sur ce graphique, en joignant les points correspondant à des diminutions relatives (*d*) de 10, 15, 25 et 50 p. 100 par rapport aux différents taux de comptage maxima, on obtient des lignes pouvant être assimilées à des droites. A partir des équations de ces droites et en transformant le taux de comptage en taux d'humidité volumique à l'aide de

la courbe d'étalonnage (graph 1), il devient possible de calculer la profondeur à laquelle on obtient des mesures réduites de d p. 100 par rapport à l'humidité réelle.

L'équation générale des droites étant :

$$y = ax + b$$

la formule permettant d'obtenir la profondeur z à laquelle on commet une erreur relative d p. 100 sur l'humidité réelle H est la suivante :

$$z = a\left(\frac{100 - d}{100}\right) H + b$$

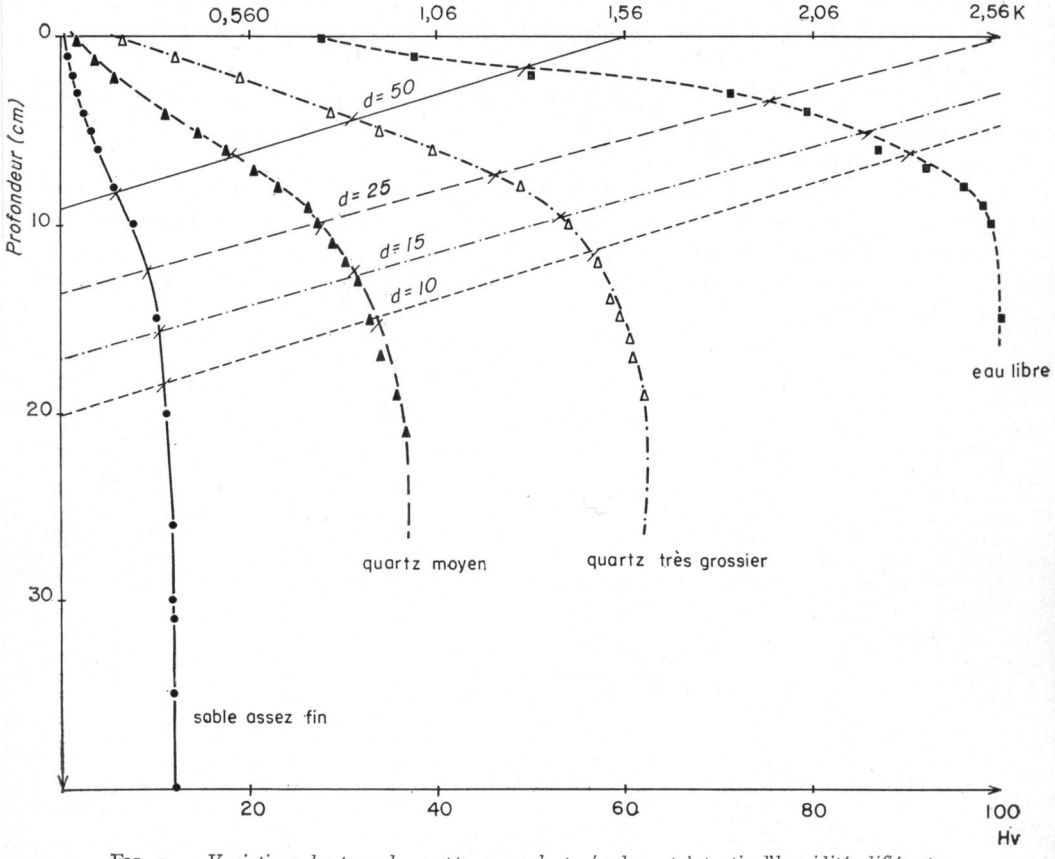


FIG. 3. — *Variations des taux de comptage avec la profondeur et à partir d'humidités différentes et droites joignant les points correspondant aux diminutions relatives de 10, 15, 25 et 50 p.100 de l'humidité volumique réelle*

Par exemple, pour ne pas commettre une erreur relative de plus de 10 p. 100 sur une humidité réelle de 12 p. 100, connaissant l'équation de la droite correspondant à la diminution relative $d = 10$ p. 100 :

$$z = -0{,}16\ x + 20$$

la profondeur minimum y, doit être :

$$z = -0{,}16 \left(\frac{100 - 10}{100}\right) 12 + 20 = 18{,}3 \text{ cm}$$

Comme on peut le constater sur le graphique 3, pour une erreur relative donnée, la profondeur augmente avec la diminution du taux d'humidité réelle ; Il n'en est pas de même si l'on considère les erreurs absolues.

Le graphique 4, à ce sujet, indique les profondeurs minimales pour ne pas commettre des erreurs absolues supérieures à 1, 2 et 4 p. 100 Hv.

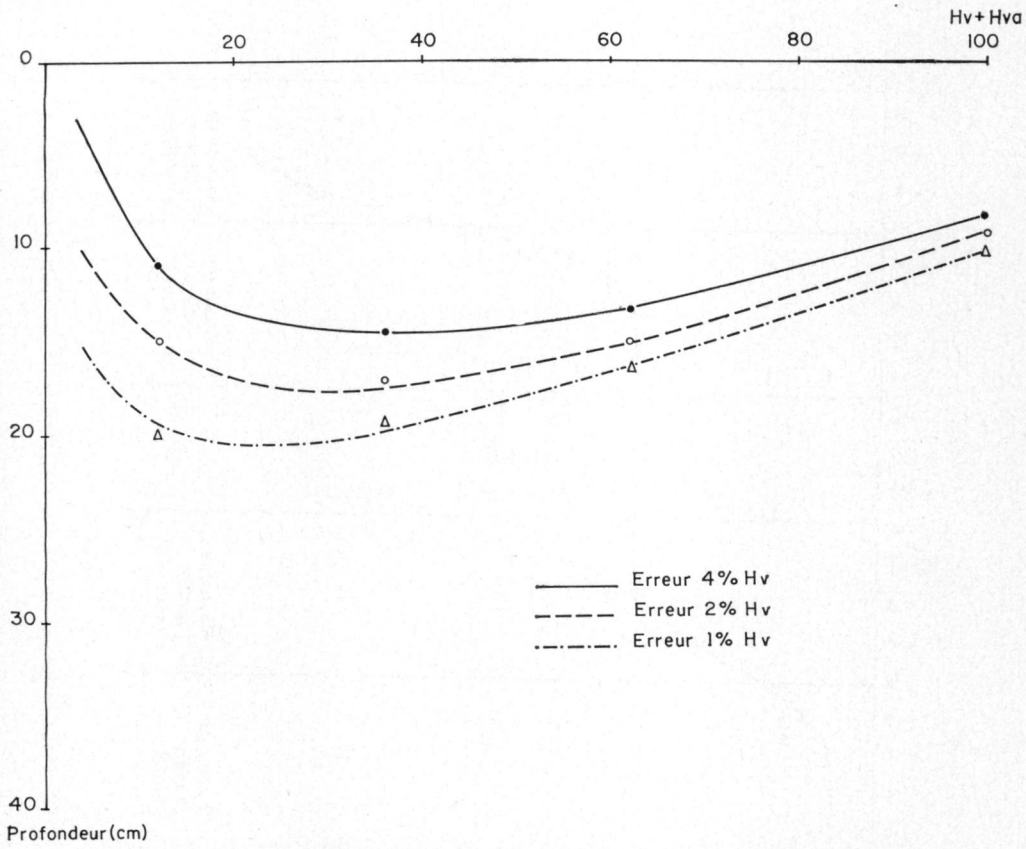


FIG. 4. — *Courbes indiquant les profondeurs où l'on commet des erreurs absolues de 1 p. 100, 2 p. 100, 4 p. 100 Hv en fonction de l'humidité volumique*

2) *Influence sur le taux de comptage de la succession de deux milieux d'humidité différente.*

Les sols sont généralement constitués d'horizons successifs dont la constitution et l'humidité sont variables.

Lorsque l'on passe d'un milieu humide à un autre milieu humide, dans chacun de ces milieux, l'influence de l'autre ne se fait sentir qu'à une distance inférieure à la sphère d'influence.

Par exemple, pour deux milieux : eau et quartz saturé d'eau ayant un taux de comptage correspondant à 62,5 p. 100 d'humidité, l'influence sur ce taux ne se fait sentir qu'à partir de 8 cm de la surface de séparation des deux milieux, alors que les sphères d'influence sont respectivement de 15 cm pour l'eau et 17,5 cm pour le quartz saturé. Une constatation du même genre a été faite pour deux autres milieux : quartz et sable saturés d'eau (graph. 5).

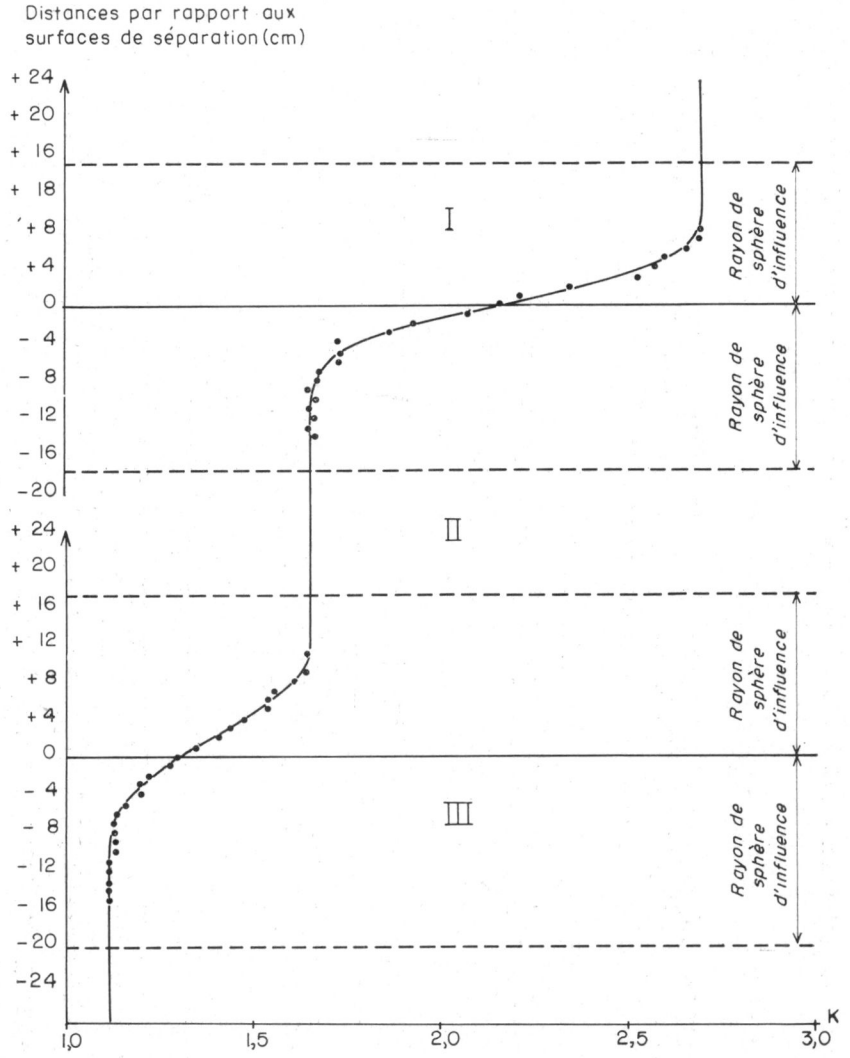


FIG. 5. — *Variations du taux de comptage quand on traverse des milieux d'humidités différentes*

I : eau,
II : gravier de quartz saturé d'eau,
III : sable grossier saturé d'eau.

Malgré les variations progressives du taux de comptage quand on passe d'un milieu à l'autre, il semble que, dans le cas des sols, la réserve d'eau réelle sur l'en-

semble de la tranche de 20 cm (couvrant 10 cm de part et d'autre de la surface de séparation) est sensiblement la même que celle calculée à partir des courbes de l'humidimètre.

3° Influence de l'eau libre

Si l'appareil est précis dans les cas où le milieu ne contient pas d'eau libre, il est apparu que les mesures effectuées en milieu saturé ne reflètent pas l'humidité volumique réelle. Les écarts constatés entre ces dernières et les résultats de l'appareil varient avec la texture.

L'examen du tableau 2 fait apparaître que, dès l'apparition de l'eau libre, l'humidité mesurée est supérieure à l'humidité réelle. Les écarts entre les deux sont plus importants pour les textures grossières. D'autre part, ils ne sont pas dus aux taux d'humidité réelle comme on peut le constater par la comparaison des sols n° 2 et 3.

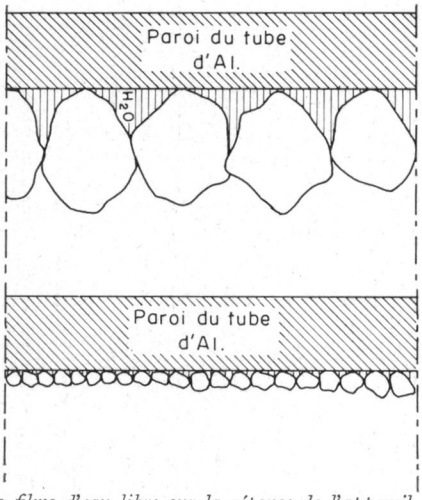


Fig. 6. — *Influence des films d'eau libre sur la réponse de l'appareil dans deux sols différents*

L'hypothèse la plus vraisemblable serait la présence immédiate autour du tube d'aluminium d'une couche d'eau irrégulière mais d'autant plus épaisse que la texture est plus grossière (graph. 6).

Dans ces conditions, pour une même humidité réelle, l'appareil à neutrons donnera des résultats variant avec la texture et donc avec l'épaisseur moyenne du manchon d'eau. Celui-ci influence d'autant plus les neutrons qu'il est directement en contact avec le tube.

Des essais effectués en coulant des manchons de paraffine d'épaisseur variable autour des tubes en aluminium montrent que des corps hydrogénés, même s'ils sont minces, impressionnent fortement l'appareil lorsqu'ils sont au contact du tube d'aluminium. C'est ainsi qu'avec une épaisseur de paraffine de 7,5 mm environ, coulée autour du tube, nous avons obtenu un écart de 39 p. 100 entre l'humidité mesurée et l'humidité réelle d'un sol en place, et un écart de 21,5 p. 100 pour une épaisseur de 2 mm.

TABLEAU 2

Écart entre l'humidité mesurée et l'humidité réelle en présence d'eau libre pour des milieux de granulométries différentes

Milieu	Fraction granulométrique en μ % de sol							Hv mesuré	Hv réel	Écart	Pourcentage d'erreur
	< 50	50-200	200-500	500-2 000	2 000-4 000	4 000-8 000	8 000				
N° 1 Sable grossier non saturé	0,02	1,90	34,70	54,40	1,85	1,95	4,70	13,5	13,4	0,1	0,7
Sable grossier saturé	—	—	—	—	—	—	—	42,5	39,0	3,5	9,0
N° 2 Graviers de quartz moyen	0	0,08	0	49,85	50,00	0	0	56,0	45,0	11,0	24,5
N° 3 Graviers de quartz grossier	0	0	0	0,30	72,50	27,20	0	62,5	45,0	17,5	39,0

Quoiqu'il en soit, il est prudent, surtout dans les sols à particules grossières, de ne pas utiliser l'appareil à neutrons quand l'humidité dépasse la capacité au champ, sous peine d'obtenir des humidités supérieures aux humidités réelles.

4° Discussion : limites d'utilisation

L'humidimètre à ralentissement de neutrons permet d'obtenir de façon suffisamment précise l'humidité volumique absolue (1 000°) qui comprend l'humidité généralement déterminée à 105° et l'équivalent eau de l'hydrogène entrant dans la constitution de différents corps (argile, matière organique, etc.).

La dispersion des points observés sur la courbe du graphique 1 peut s'expliquer en grande partie par les écarts très importants d'humidité constatés sur les prélèvements destinés à l'étalonnage. La précision de l'appareil apparaît donc excellente comme l'ont indiqué Andrieux et *al.* (1962).

Outre sa facilité d'utilisation, l'un des principaux avantages de ce type d'appareil est de pouvoir opérer toujours au même endroit, sur un profil déterminé, ce qui permet une étude précise de la dynamique de l'eau.

Cependant, son utilisation présente certaines limites. Notamment pour l'estimation du potentiel capillaire ; à partir de l'humidité mesurée, on est obligé de transformer l'humidité volumique absolue en humidité pondérale à 105°. Pour de telles études, il faudrait connaître de façon précise la valeur de l'eau de constitution et la densité apparente. A ce propos, il faut remarquer qu'il est illusoire de déterminer la densité apparente à partir des humidités pondérales obtenues par prélèvement, et des humidités volumiques données par l'appareil $\left(\rho = \frac{Hv}{Hp}\right)$. En effet, la grande hétérogénéité de l'humidité pondérale et les volumes de sol différents intéressés par les deux méthodes de mesure, ne permettent pas une précision convenable, l'erreur relative sur la densité apparente obtenue par cette méthode peut atteindre 40 p. 100.

Les résultats obtenus à l'aide de la sonde à neutrons ne sont valables que dans certaines limites d'humidité, car, dès l'apparition de l'eau libre, les mesures sont systématiquement trop fortes.

De son côté, la sphère d'influence a deux conséquences :

— il est impossible de connaître les humidités des tranches supérieures du sol. Par exemple, les mesures doivent être faites à une profondeur minimum de 20 cm si l'on tolère une erreur absolue de 1 p. 100 Hv ;

— l'appareil ne permet pas non plus d'obtenir l'humidité exacte d'un point précis, mais seulement l'humidité moyenne d'un volume de terre variable suivant les conditions d'humidité. Le volume est cependant toujours inférieur à la sphère d'influence théorique. Par contre, cet appareil mesurant directement l'humidité volumique, facilite l'établissement des bilans hydriques, en évitant de faire appel à la densité apparente. De plus, pour leur détermination, il n'est pas nécessaire de tenir compte de l'eau de constitution. En effet, si les droites ont alors des ordonnées à l'origine différentes d'un sol à l'autre, leur coefficient angulaire est pratiquement le même (Damagnez, 1962) ; il s'ensuit que l'erreur commise sur Hv est systématique et n'intervient plus dans les bilans.

III. — EXEMPLES D'UTILISATION DE L'APPAREIL

1° *Évolution d'un profil hydrique et calcul du coefficient d'utilisation des réserves*

Des mesures effectuées périodiquement de 10 cm en 10 cm dans des tubes d'aluminium en place, permettent de suivre au cours du temps, les mouvements de l'eau dans le sol. Nous donnons ici un exemple pris dans un sol argilo-limoneux,

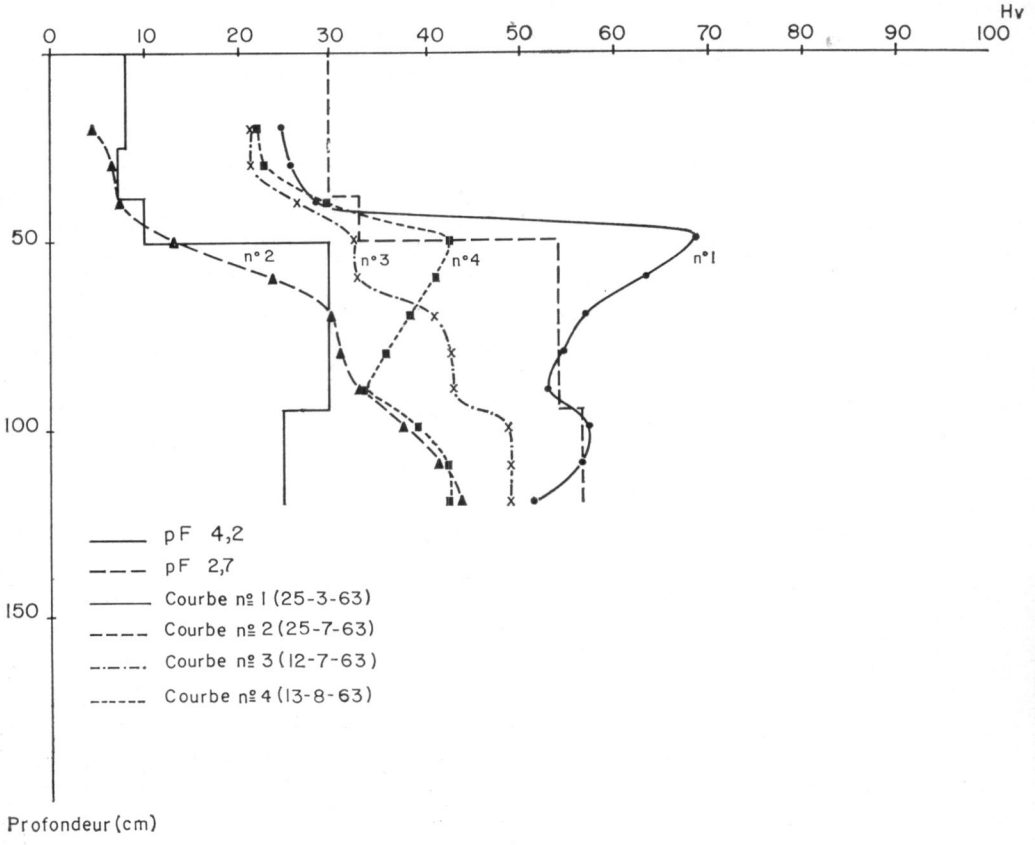


FIG. 7. — *Évolution d'un profil hydrique dans un sol argilo-limoneux*

lessivé, sur lequel se trouve une culture de luzerne (MAERTENS et STUDER, 1963). Le sondage est allé jusqu'à 1,20 m de profondeur. La détermination des humidités correspondant à la capacité au champ ($pF = 2,7$) et au point de flétrissement permanent ($pF = 4,2$) pour les différents horizons du profil a été obtenue à partir des courbes pF — teneur en eau (STUDER, 1961). Elle permet d'estimer les réserves d'eau utilisables à 300 mm environ sur une profondeur de 1,20 m. Les courbes de profils hydriques ont été établies à partir des mesures effectuées avec l'humidimètre

à neutrons et complétées, pour les vingt premiers centimètres de sol, par les humidités volumiques de prélèvements dont on a déterminé au préalable les humidités pondérales et les densités apparentes. Le planimétrage des surfaces comprises entre elles permet de calculer les quantités d'eau perdues ou gagnées par le sol. C'est ainsi que le graphique 7 comporte quatre courbes établies de cette façon. A la courbe 1 (25-3-63) correspond une humidité qui atteint approximativement la capacité au

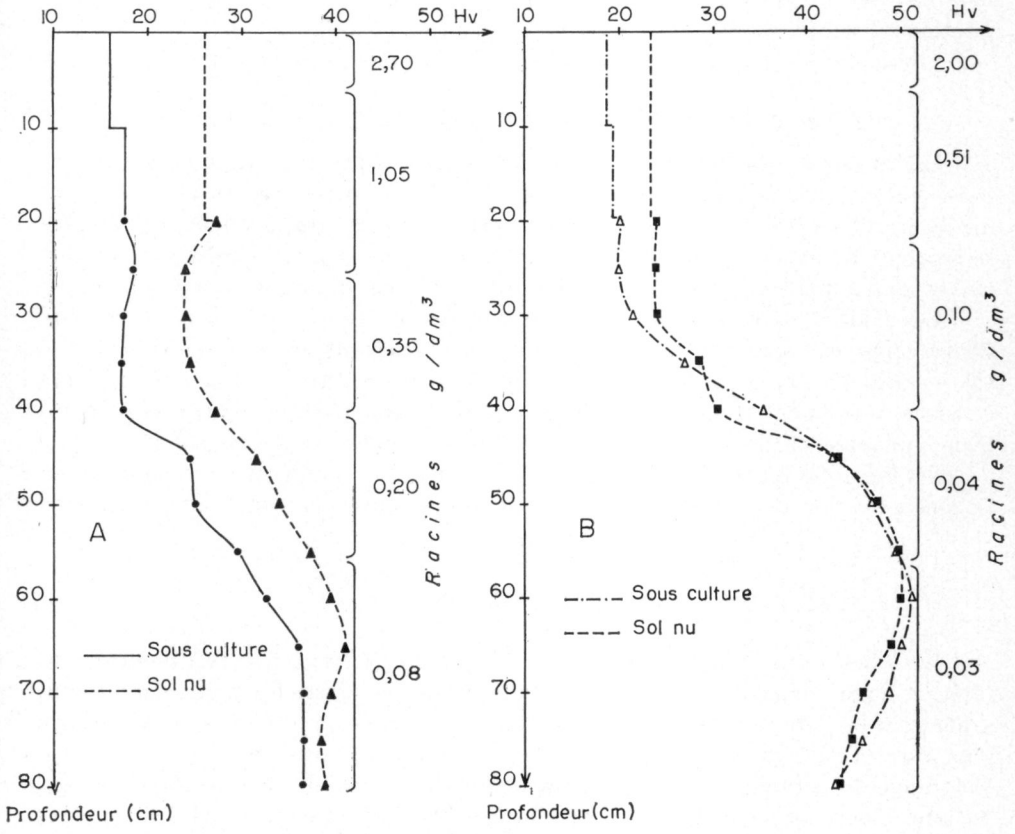


FIG. 8. — *Dessiccation du sol en relation avec l'enracinement*
A : enracinement profond,
B : enracinement superficiel.

champ sur une partie du profil. Cependant, la courbe de l'humidimètre s'écarte notablement de la courbe correspondant à la capacité au champ à partir de 50 cm de profondeur jusqu'à environ 70 cm. La présence d'eau libre à ce niveau peut entraîner une surestimation de l'humidité par l'appareil. C'est pourquoi, dans le calcul des réserves utilisables, nous n'avons pas considéré cette courbe 1, mais avons planimétré la surface comprise entre la courbe de la capacité au champ et la courbe 2 (25-7-63) correspondant au dessèchement maximum. Celle-ci se superpose assez bien à celle de pF 4,2 jusqu'à une profondeur de 70 cm, profondeur à partir de laquelle la plante n'a pas épuisé la totalité des réserves utilisables. Déterminées dans ces

conditions, les réserves d'eau utilisées s'élèvent à 260 mm, soit un coefficient d'utilisation de :

$$\frac{260 \times 100}{300} = 87\ \%$$

La courbe 3 (12-7-63) correspond à une humidité intermédiaire entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, cependant que la courbe 4 (13-8-63) indique une réhumectation du sol jusqu'à 90 cm, consécutive à d'importantes précipitations.

L'humidimètre permet donc de bien suivre les mouvements d'eau dans le sol.

2° *Influence de l'enracinement sur l'évolution des profils hydriques*

Les mesures d'humidité ont été effectuées au printemps avant ouverture de fosses empiétant à la fois sur une culture de trèfle violet-ray-grass et sur un sol nu. Nous avons opéré sur 2 types de sol dont les propriétés physiques différentes se répercutent sur l'enracinement. Les profils hydriques ont été établis pour chacun de ces sols d'une part sous culture, d'autre part à environ 1,50 m sur sol nu.

Les courbes établies sous culture sont décalées vers des humidités moins élevées. Ce décalage est beaucoup plus important principalement en profondeur, dans le sol A où le développement radiculaire a été plus abondant. Dans ce cas, on peut constater une dessiccation jusqu'à environ 70 cm. Par contre, pour la culture moins bien implantée, la dessiccation est pratiquement arrêtée à 35 cm (sol B).

Cet exemple illustre les possibilités d'utilisation de l'humidimètre pour suivre la consommation de l'eau, en relation avec le développement du front radiculaire.

CONCLUSION

Les études concernant l'étalonnage et les limites d'utilisation ont montré l'intérêt de l'humidimètre à neutrons. La précision de cet appareil est largement suffisante pour les déterminations de l'humidité en agronomie. Il est d'une manipulation plus aisée et plus rapide que la méthode classique par carottage. Il présente aussi l'avantage de permettre plusieurs mesures dans le temps au même endroit, ce qui est la meilleure méthode d'étudier les mouvements de l'eau dans le sol. Les volumes de sol intéressés par les mesures de l'appareil plus grands que ceux par carottage réduisent l'apparition des cas particuliers due à l'hétérogénéité du milieu. Cependant, l'importance de ces volumes interdit les mesures trop près de la surface et modifie légèrement l'allure des profils hydriques dans le cas où il y a succession de plusieurs horizons. Ceci est sans grande répercussion dans la détermination des bilans.

Le principe même de son fonctionnement rend nécessaire la détermination de la densité apparente pour comparer les teneurs en eau et les potentiels capillaires ; cet inconvénient est largement compensé par l'obtention directe de l'humidité volumique.

L'humidimètre à neutrons est, de ce fait, particulièrement bien adapté aux études de bilan hydrique et peut, de même, permettre de suivre facilement la consommation de l'eau en relation avec le développement végétatif.

Reçu pour publication en février 1965.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la section de radio-agronomie du C. E. A. et spécialement M. MARCESSE pour les indications qu'il a bien voulu nous fournir au sujet du fonctionnement de l'humidimètre à neutrons.

SUMMARY

DETAILS OF THE USE IN AGRICULTURE OF SOIL-MOISTURE DETERMINATION BY THE NEUTRON-SCATTERING METHOD

The principles of moisture determination by the neutron-scattering method are reviewed, and tests for assessing the precision and limitations of the apparatus are described.

Calibration on soils *in situ* yields a straight line from which levels of moisture by volume may be determined with high precision.

The minimum depths to which measurements may be made were determined by a study of spheres of influence, and this study also for defining the behaviour of the apparatus when in contact with several horizons of different moisture content. Operating to a depth exceeding 20 cm assures that the absolute value of error will not exceed 1 p. 100 ; a succession of several horizons does not carry any material error in the calculation of moisture balance.

Measurements made on media that contained free moisture consistently yielded too high values, and were in this case affected by the mechanical composition of the soil.

Some examples are given of the possibilities in utilizing the apparatus for following the evolution of moisture profiles and estimating moisture balance.

The neutron method of moisture determination has several advantages over the traditional techniques, especially by making operation in the same place possible and directly yielding values of moisture by volume by rapid measurements.

ZUSAMMENFASSUNG

ART DER VERWENDUNG EINES FEUCHTIGKEITSMESSERS MIT NEUTRONENVERZÖGERUNG

Nach einer kurzen Wiederholung der Prinzipien des Feuchtigkeitsmessers mit Neutronenverzögerung beschreibt man die Versuche, die die Genauigkeit und die Anwendungsgrenzen dieser Apparate bestimmen sollen.

Das Eichen im Boden ergibt eine Gerade, von welcher ausgehend man die Volumgrade der absoluten Feuchtigkeit (1 000⁰) mit grosser Genauigkeit bestimmen kann.

Die minimalen Tiefen, bei denen die Messungen ausgeführt werden können, wurden durch das Studium der Einflusssphären bestimmt. Dieses Studium diente ebenfalls, das Benehmen des Apparates in Berührung mit Horizonten verschiedener Feuchtigkeit zu bestimmen. So hat man die Gewissheit, sobald man bei einer Tiefe, die 20 cm übersteigt operiert, keinen Fehler zu begehen, der 1 p. 100 des absoluten Wertes übersteigt. Anderseits ergibt die Folge mehrerer Horizonte keinen nennenswerten Fehler in der Berechnung der Bilanz.

Die Messungen in einem Milieu mit freiem Wasser erschien systematisch zu hoch, in diesem Falle durch die Korngrösse der Böden beeinflusst.

Einige Beispiele der Anwendung zeigen die Möglichkeiten des Apparates um die Evolution der Wasserprofile zu verfolgen und daraus die Bilanz zu ziehen.

Der Neutronen-Feuchtigkeitsmesser hat auf die gewöhnlichen Feuchtigkeitbestimmungen mehrere Vorteile, insbesondere :

die Möglichkeit, immer am selben Ort zu arbeiten,
eine schnelle Ausführung,
eine unmittelbare Bestimmung der volumetrischen Feuchtigkeit.

РЕЗЮМЕ

Условия применения нейтронного измерителя влажности в агрономии. МАЭРТЕНС — Шатору.

За напоминанием общих принципов действия нейтронного влагомера, следует описание нескольких опытов проведенных для определения точности и пределов применения этого аппарата.

Калибраж, проделанный в почвах на местах, привел к получению прямой, исходя от которой возможно с большой точностью определить количество абсолютной обменной влаги (1 000).

Минимальные глубины на которых можно производить измерения были определены при помощи изучения сфер влияния, изучения, которое выявило также разницу в поведении аппарата при соприкосновении с горизонтами разного увлажнения. Таким образом, есть уверенность, что при опытах на глубинах не превышающих 20 см., ошибка не превысит 1 % в абсолютных величинах. С другой стороны, чередование нескольких горизонтов не вызывает ощутительных ошибок при подведении итогов.

Результаты измерений произведенных в среде содержавшей свободную влагу систематически оказались слишком крупными, в данном случае под влиянием гранулометрии почв.

Несколько примеров, иллюстрируют возможность следить при помощи этого аппарата, за эволюцией водных профилей и подводить итоги.

По сравнению с традиционными приемами измерения влажности почв нейтронный влагомер представляет некоторые преимущества, в частности :

— возможность оперировать всегда на том-же месте;
— быстрота работы;
— прямое получение об'емной влажности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDRIEUX C., BUSCARLET L., GUITTON J., MÉRITE B., 1962. Mesure en profondeur de la teneur en eau des sols par ralentissement des neutrons rapides. *Radioisotopes soil-Plant nutr. Stud. Inter. Atomic Energy Agency*, Vienne 1962, 187-219.

BRYSSINE G., 1953. Notions de pédologie appliquée. *Rech. Agric. et Exp. Agric., Rabat*, 98.

DAMAGNEZ J., 1962. Conditions d'utilisation de la sonde à neutrons pour la détermination d'humidité dans le sol. Influence de la densité apparente et de la salure. *Radioisotopes soil-Plant nutr. Stud. Inter. Atomic energy Agency*, Vienne 1962, 159-169.

DE BOODT M., DE LEENHEER L., MORTIER P., 1963. De praktische Bruikbaarheid in de bodenkunde van de methode van de neutronendiffusie. *Mededelingen Landbouwhogschool., Gent., XXVIII*, 85-132.

HANKS R. S., BOWERS S. A., 1960. Neutron meter access tube influences soil temperature. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.* 24 (*U. S. D. A., Manhottan, Kans*), 62-63.

HOLMES J. W., JENKINSON A. F., 1959. Techniques for using the neutron moisture meter. *J. agric. Engng. Res.*, **4**, 100-109.

MAERTENS C., STUDER R., 1963. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement des systèmes radiculaires de différentes cultures : répercussions sur le rendement. *C. R. Acad. Sci.*, **256**, 2016-2018.

MCGUINNESS J. L., DREIBELBIS F. R., HARROLD L. L., 1961. Soil moisture measurements with the neutron method supplement weighing lysimeters. *Soil Sci. amer. Proc.*, **25**, 339-342.

PERRIER E. R. and JOHNSTON W. R., 1962. Distribution of thermal neutrons in a soil-water system. Univ. Calif., Davis, *Soil Sci.*, **93**, 104-112.

STUDER R., 1961. Méthode de détermination des réserves hydriques des sols. *Ann. agron.*, **12**, 599-608.

VAN BAVEL C. H. M., UNDERWOOD M., SWANSON R. W., 1956. Soil moisture measurement by neutron moderation. *Soil Sci.*, **82**, 29-42.

VAN BAVEL C. H. M., NIELSEN D. R., DAVIDSON J. M., 1961. Calibration and characteristics of two neutron moisture probes. *Soil Sci. amer. Proc.*, **25**, 329-334.

Ann. agron., 1965, **16** (1), 25-51.

ERRATA

L'INOCULATION DE LA LUZERNE

II. — Résultats de l'expérimentation

M. OBATON, H. BLACHÈRE
avec la collaboration technique de H. François, M. Skajennikoff et A. M. Tabareau
Laboratoire de Microbiologie des Sols, Versailles (Seine-et-Oise)

Page 26, au paragraphe II. — L'INOCULUM
lire : 0,50 mMoles ; au lieu de : 0,50 µmoles.

Page 27, retourner la figure 1, la parcelle témoin étant à droite, et la parcelle inoculée à gauche.

Page 29, au paragraphe : b) *Jaunissement partiel puis dépeuplement du témoin*
lire : les parcelles non inoculées, au lieu de : les parcelles inoculées.

Page 33, au paragraphe : *Évolution de l'essai*
— 23 juillet :
Parcelles A et B Taille : 52-57 cm, au lieu de : 67 cm

Page 45,
g) *Essai de Vitry-le-François* (Marne)
au paragraphe : — Analyse de sol
lire : Calcaire total..... 583, au lieu de : 5,83
au paragraphe — *Résultats*
lire : sous-bois, au lieu de : sous-sol.

Page 47, Tableau 10 : (rectificatif au verso)

Imprimerie Bussière 14-1-1966.

TABLEAU IO

Nature du sol et action de l'inoculation

	Nature du sol					Résultat de l'inoculation	
	Nature	pH (Cl_2Ca)	Richesse en :			Augmentation du rendement par rapport au témoin (sur M.S.).	Rendement total de l'année (en t/ha M.S.)
			P_2O_5 ass.	K_2O ass.	Ca échangeable p. 1 000		
Marcenat (Cantal)	Basaltique	5,4	moyen	riche	1,50	30 %	40
Ceyssat (Puy-de-Dôme)	Pouzolane	6,3	pauvre	pauvre	1,22	75 %	9
Saint-Pierre-Duchamp (Haute-Loire)	Arène granitique	5,9	moyen	riche	1,02	témoin disparu	25
Lopérec (Finistère)	Schistes (chaulés)	5,7	riche	riche	2,70	non significatif	37
Marigny-en-Orxois (Aisne)	Limon battant	6,9	pauvre	pauvre	1,16	113 %	—
La Minière (S.-et-O.) 1962	Limon battant	6,0	riche	riche	1,96	non significatif	77
La Minière essai 1963	Limon battant	6,0	riche	riche	1,96	22 %	—
Vitry-le-François (Marne)	Crayeux	8,1	moyen	pauvre	8,16	non significatif	—

Ann. agron., 1965, **16** (1), 25-51.

L'INOCULATION DE LA LUZERNE

II. — Résultats de l'expérimentation

M. OBATON, H. BLACHÈRE

Avec la collaboration technique de H. François, M. Skajennikoff, et A. M. Tabareau

Laboratoire de Microbiologie des Sols, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Pour étudier l'intérêt de l'inoculation de la luzerne dans les sols français, les auteurs ont entrepris une expérimentation en deux temps. La première phase a consisté à faire réaliser un très grand nombre d'essais de comportement. Ces essais ont permis de déterminer les sols où la déficience des *Rhizobium meliloti* était très forte. Une deuxième phase d'expérimentation précise est en cours. Les premiers résultats sont publiés et des hypothèses sont formulées en ce qui concerne les facteurs agissant sur la vie des *Rhizobium meliloti* dans le sol ou leur aptitude à former des nodules.

I. — INTRODUCTION

Cet article constitue le résumé de cinq années d'expérimentation en France, concernant l'inoculation des graines de Luzerne.

En fait, le mot « inoculation » que nous emploierons, car il est consacré par l'usage, est impropre. Il s'agit plus exactement de l'enrobage des graines avec un adjuvant solide sur lequel est adsorbée la culture de *Rhizobium meliloti*.

L'inoculation de la luzerne est très largement répandue dans de nombreux pays étrangers, mais il fallait en étudier les conditions d'utilisation pour les sols français. Demolon avait entrepris des essais qui furent interrompus par sa mort en 1954. Certes, il avait pu démontrer l'intérêt de l'inoculation de la luzerne dans certaines régions de France. Toutefois, les facteurs influant sur la présence et la multiplication du *Rhizobium* dans le sol étaient encore trop mal connus pour qu'il soit possible de prévoir l'importance réelle de l'inoculation pour de nombreux sols.

Après avoir mis au point les techniques d'isolement, de sélection et de culture

de *Rhizobium meliloti* (OBATON, BLACHÈRE et FERRY, 1959) nous avons donc établi un programme d'expérimentation en plein champ. Nous avons tout d'abord entrepris une vaste investigation en effectuant un très grand nombre d'essais simples. Puis, à la lumière des premiers résultats ainsi obtenus, nous avons commencé une expérimentation précise pour analyser les cas les plus intéressants.

Après avoir résumé la technique de la fabrication du produit pour inoculer, nous passerons en revue les conclusions de la phase d'expérimentation simple, et enfin exposerons les renseignements complémentaires qui ont déjà pu être tirés de la première année d'expérimentation précise.

II. — L'INOCULUM

Un certain nombre de souches de *Rhizobium* ont été isolées et testées au laboratoire en 1958 (OBATON, BLACHÈRE et FERRY, 1959). La souche *Sa 10* qui possède un pouvoir fixateur particulièrement élevé a été retenue.

Les *Rhizobium* sont cultivés dans un fermenteur, spécialement mis au point au laboratoire ; la température optimale est de 30°, l'aération et l'agitation sont réglées pour obtenir un coefficient de transfert d'oxygène de 0,50 µmoles d'O_2/litre/mn déterminé par la méthode de Schultz et Gaden (1956).

La culture est arrêtée à un stade de croissance déterminé photométriquement et situé à la fin de la phase exponentielle.

Cette culture est aussitôt répartie stérilement dans des flacons contenant un support inerte poreux stérilisé. Le produit contient plus d'un milliard de germes au gramme au moment de sa fabrication. Au bout de trois mois de conservation à la température ambiante, il renferme encore 100 à 500 millions de germes vivants par gramme ; nous considérons ce chiffre comme la limite inférieure qu'il est prudent de ne pas dépasser pour obtenir une inoculation correcte.

III. — LES ESSAIS DE COMPORTEMENT

1. — ORGANISATION DES ESSAIS

Ce sont les essais simples de la première phase d'expérimentation. Ils comportent les deux traitements : non inoculé et inoculé, avec un nombre variable de répétitions.

L'objectif en est :

— Pour les sols où la culture de la luzerne est réputée impossible, de déterminer si cela est dû à une déficience des bactéries spécifiques, et dans ce cas, d'étudier si la culture de cette plante peut être introduite d'une façon rentable grâce à l'inoculation.

— Pour les sols où la luzerne reste chétive, voir si cela est dû à une insuffisance des bactéries spécifiques.

Dans ces deux cas, la différence de rendement entre parcelle témoin et traitée est considérable, des essais précis ne sont donc pas indispensables. Le nombre des essais est donc plus important que leur précision si l'on veut que cette investigation soit réellement utile.

Les essais de comportement peuvent donc être effectués par des expérimentateurs locaux ou des agriculteurs.

Le laboratoire leur envoie :

— le produit pour inoculer ;

— une documentation (BLACHÈRE, 1959), comportant les renseignements nécessaires pour inoculer et mettre en place un essai simple ;

— un jeu de questionnaires permettant de suivre l'essai et de déterminer les causes ayant provoqué la réussite ou l'échec.

II. — Les résultats obtenus

De nombreux essais ont ainsi pu être réalisé dans 70 départements. Nous avons visité 80 essais.

Le résultat de 142 essais a été utilisable.

— 74 soit 52,1 p. 100 sont positifs, c'est-à-dire correspondent à une augmentation de rendement due au traitement nettement visible à l'œil (supérieure à 30 p. 100).

— 48 soit 33,7 p. 100 sont négatifs, c'est-à-dire ont donné lieu à une culture correcte de luzerne même sans inoculation.

S'il y a une différence de rendement, elle n'est pas visible à l'œil (inférieure à 30 p. 100).

— 20 soit 14,1 p. 100 ont donné lieu à un échec de la culture par suite de profondeur insuffisante du sol ou d'erreurs techniques.

Ces chiffres n'ont qu'une valeur indicative car il est évident que les agriculteurs qui ont demandé à faire des essais se situent surtout dans les régions où la culture de la luzerne est difficile.

III. — Les effets observés

Rappelons d'abord quelques points qui permettront d'éclairer les observations effectuées sur les essais.

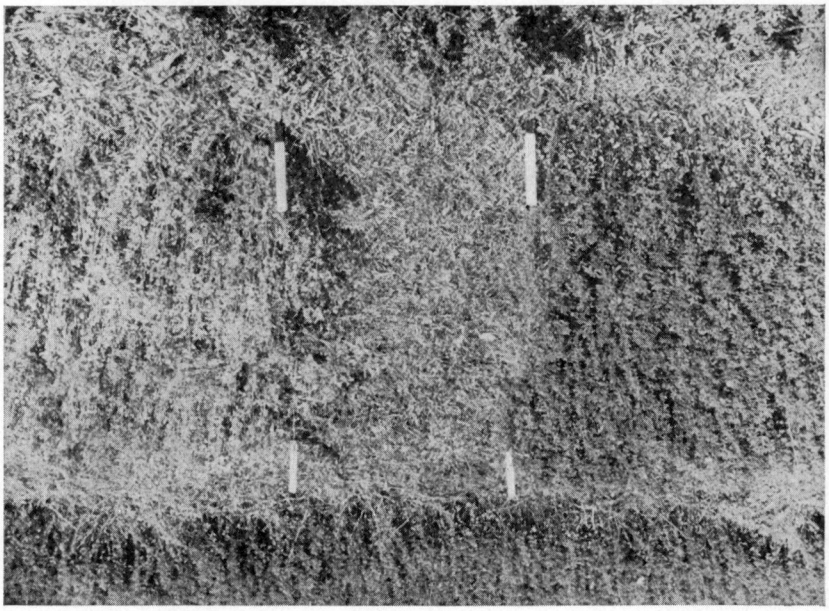


Fig. 1. — *Pleyben* (Finistère)

(Cliché Coppenet)

Cette vue a été prise l'année du semis. Après une levée normale, la parcelle témoin (à gauche) est complètement jaune, elle ne tardera pas à dépérir.
La parcelle inoculée (à droite) montre une végétation correcte.
Sol acide chaulé sur sous-sol de schistes fendillés.

Lorsque les racines d'une légumineuse ne portent pas de nodule, deux causes peuvent être évoquées :

— l'absence de *Rhizobium* spécifique ;

— l'incapacité de ces *Rhizobium* à pénétrer dans la plante par suite de conditions défavorables de milieu.

Nous avons étudié dans un article précédent des cas typiques de déficience numérique des *Rhizobium* (OBATON, BLACHÈRE, 1963). Il n'est cependant pas exclu que l'inaptitude à contaminer la plante ait pu également intervenir, cet aspect de la question fera l'objet d'une analyse ultérieure.

FIG. 2. — *Pierrefite* (Calvados)

(Cliché OBATON)

Cette vue a été prise pendant la 3e année de culture. Au premier plan, parcelle témoin, il ne reste plus de luzerne ; au fond, parcelle inoculée montrant une végétation correcte. Sol acide (pH 5,3) sur schistes.

D'autre part, en présence de souches efficaces, les nodosités apparaissent dès la première feuille. Si donc, il ne se forme pas de nodules actifs, les signes de « faim d'azote » peuvent être visibles très tôt. Cependant, la luzerne peut utiliser les réserves azotées du sol, l'apparition des signes de carence sera donc retardée jusqu'à disparition de l'arrière-effet des fumures azotées.

L'observation du comportement de la parcelle non inoculée (précocité et intensité des signes de carence en azote) permet de classer les essais. Tous les intermédiaires existent entre les essais typiques que nous prendrons pour exemple.

a) *Jaunissement homogène puis disparition complète du témoin*

Après la levée, la luzerne non inoculée jaunit plus ou moins rapidement suivant les réserves azotées du sol (photo 1) puis disparaît complètement (photo 2).

Ce phénomène se présente uniquement dans les sols acides. Dans ce cas, la plante non inoculée ne porte aucun nodule. Tout se passe comme si le sol ne contenait pas de *Rhizobium meliloti*.

b) *Jaunissement partiel puis dépeuplement du témoin*

En observant les plantes dans les parcelles inoculées, il est fréquent que l'on fasse les observations suivantes :

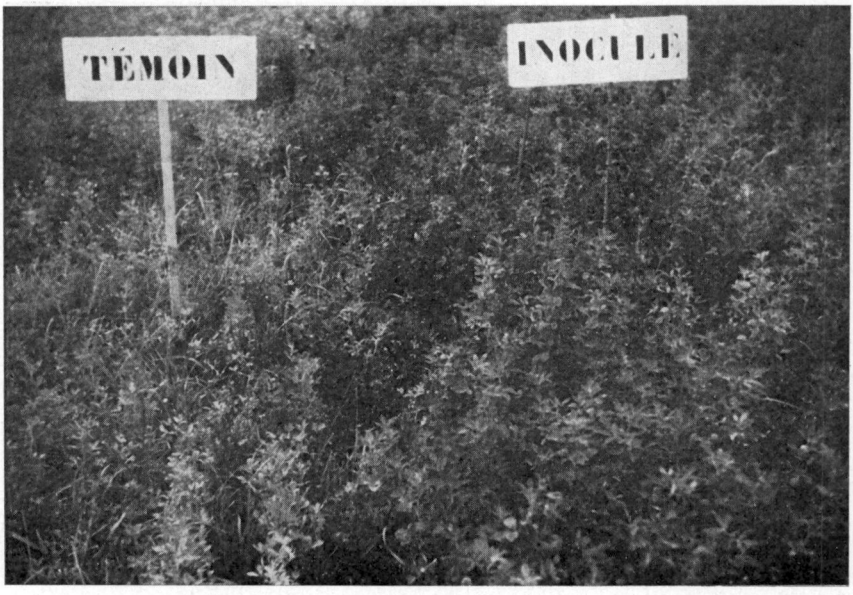


FIG. 3. — *Castillon-en-Bessin* (Calvados)

(Cliché OBATON)

Photo prise l'année du semis. Dans la parcelle témoin, la plupart des pieds de luzerne sont jaunes par manque de nodules, tous ces pieds disparaîtront. Quelques pieds sont verts, ils portent des nodules.
La végétation de la parcelle inoculée est excellente (rendement 16,5 t/ha en matière sèche en 2e année).
Sol acide chaulé sur sous-sol de schistes délités.

— En première année, le jaunissement de la parcelle témoin est irrégulier. Elle présente de nombreux pieds jaunes, chétifs et quelques pieds verts de petite taille. Ces plantes chlorotiques ne portent pas de nodules, elles sont donc privées d'azote symbiotique et mourront dès que les réserves azotées du sol seront devenues insuffisantes (photo 3). Les pieds verts, non inoculés portent tous des nodules, groupés en un seul point de la racine, et peu nombreux (5 à 10).

— En deuxième année, les pieds jaunes ont disparu, Les pieds verts subsistent et se développent, leurs nodules sont alors beaucoup plus nombreux (40 à 50), mais toujours groupés. L'alimentation de la plante en azote symbiotique est alors suffisante pour que son développement soit normal.

Si le dépeuplement n'est pas trop sévère, ces pieds peuvent taller au point de remplir tout l'espace libre.

Dans la parcelle inoculée, la végétation est correcte ; les pieds portent des nodules dispersés sur tout le système racinaire, il n'y a pas de dépeuplement précoce, car toutes les plantules ont eu à leur disposition un excès de bactéries actives.

c) *Développement moindre du témoin*

La luzerne non inoculée est plus petite que celle inoculée mais exactement de la même couleur. Plusieurs éventualités sont possible.

Des nodules peu nombreux dus à une faible contamination de la plante par les *Rizobium* peuvent donner à celle-ci une quantité trop faible d'azote pour que son

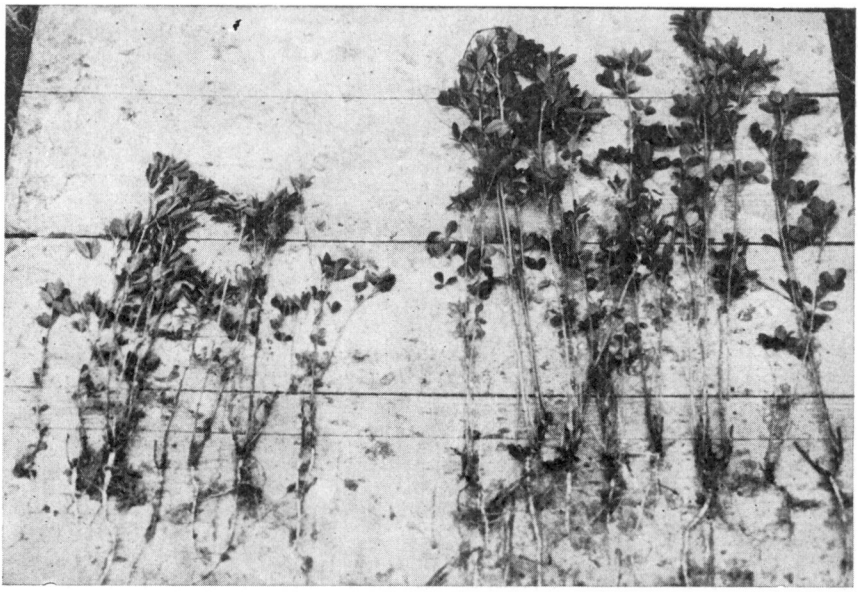


FIG. 4. — *Saint-Segal* (Finistère)

(Cliché OBATON)

La différence de taille entre les luzernes provenant de la parcelle témoin (à gauche) et de la parcelle inoculée à droite) est ici très nette. Cette différence n'existera plus trois mois plus tard.
Sol acide chaulé.

développement soit normal sans qu'il y ait pour autant jaunissement Nous avons vu précédemment que ceci correspond à une étape transitoire, car ce nombre des nodules augmente rapidement et la différence de taille n'est plus visible en 2e année. Ceci se rencontre fréquemment dans les sols d'origine acide mais chaulés (photo 4). Il arrive aussi que les *Rhizobium*, bien que nombreux, donnent lieu à une symbiose peu efficace. La quantité d'azote fixée reste toujours faible et la plante se développe peu.

IV. — Répartition géographique des résultats

A la lumière de ces essais simples, il était déjà possible de classer les régions de la manière suivante :

— Bretagne, Massif central, Vosges : l'inoculation est indispensable dans les sols acides primaires ou volcaniques. Elle permet de cultiver la luzerne de façon rentable là où cette culture était considérée comme impossible.

— Normandie, Côte atlantique, régions limitrophes du Massif central, Jura : les résultats positifs sont fréquents, ils correspondent aux sols décalcifiés de ces régions. Un essai d'inoculation doit être conseillé dans les cas où la luzerne s'établit difficilement.

— Régions de culture traditionnelle de la luzerne (Beauce, Brie, Soissonnais, plaines du Nord). L'intérêt de l'inoculation n'a pu être prouvé par ces essais simples.

V. — Conclusion des essais de comportement

Au point de vue agronomique, cette investigation portant sur de nombreux sols français nous a permis de prouver la nécessité de l'inoculation dans les sols acides et son utilité fréquente dans les sols où la luzerne « vient mal ». Nous avons pu ainsi définir à grandes lignes les régions où l'inoculation était indispensable ou utile.

Au point de vue microbiologique, ces essais ont vérifié qu'il était possible de créer une rhizosphère artificielle et que les *Rhizobium meliloti* apportés avec la graine de luzerne sont capables de survivre plusieurs années même en sol défavorable dans le micro-milieu que crée la racine.

Mais des essais établis suivant un protocole standard, permettant une analyse statistique précise, sont nécessaires pour confirmer ces résultats et analyser les sols où l'inoculation produit un effet moins spectaculaire.

IV. — LES ESSAIS PRÉCIS

L'entrée au laboratoire d'un expérimentateur en 1963 a permis d'entreprendre immédiatement 11 essais.

Les buts de ces essais sont multiples :

1. Démontrer que l'action du produit est due aux bactéries apportées, en effectuant un traitement identique avec des bactéries stérilisées.

2. Connaître exactement le rendement des luzernières implantées dans des sols réputés rebelles à cette plante.

3. Démontrer si l'inoculation peut avoir une utilité dans les « bonnes terres à luzerne », même dans les cas où aucun effet du traitement n'est visible à l'œil.

4. Étudier l'action de l'inoculation sur la richesse du fourrage en azote et sa composition en acides aminés.

5. Déterminer les facteurs influant sur la survie et la multiplication des *Rhizobium meliloti* dans le sol.

I. — Organisation des essais

Dix essais-blocs ont été effectués suivant le même plan dans diverses régions de France. De plus deux carrés latins ont été réalisés par la Station d'Expérimentation de La Minière.

Les essais blocs comportent trois traitements et 8 répétitions. La variété utilisée était *du Puits*, dose 20 kg/ha. Les traitements sont les suivants :

Traitement A : Témoin : graines humidifiées avec la même quantité d'eau que dans les traitements suivants.

Traitement B : Enrobage avec l'inoculum stérilisé.

Traitement C : Enrobage avec l'inoculum actif (souche *Sa 10*).

Ces essais sont mis en place par l'expérimentateur du laboratoire. Celui-ci assure une fauche la première année et deux fauches la seconde. L'essai est sous la surveillance permanente d'un expérimentateur ou conseiller agricole local qui, de plus, assure les autres fauches pour connaître le rendement total de l'année.

Les carrés latins réalisés à La Minière ont permis de comparer l'action de 5 souches au témoin.

Les sols choisis pour les essais de 1963 ont été les suivants :

Sols d'origine acide

Massif central.

Cantal —	Marcenat	sol basaltique acide
	Ceyssat	pouzzolane peu acide
Haute-Loire —	Bains	sol basaltique non acide
Saint-Pierre-Duchamp		arène granitique acide

Bretagne.

Finistère —	Lopérec	sol acide sur schistes
	Coray	sol peu acide sur schistes
Morbihan —	La Trinité en Surzur.	lande acide.

Sol de limon

Aisne —	Marigny-en-Orxois.....	limon battant
	Prices.....	limon
Seine-et-Oise —	La Minière.....	limon battant.

Sols calcaires

Champagne.

Marne — Vitry-le-François : défriche de pins sur craie.

L'objet de ces essais étant de tester le seul facteur inoculation, les autres facteurs de réussite, techniques culturales, fumure, amendement et exploitation sont réalisés pour chaque essai suivant les principes suivants :

— Fumure : pas d'azote ; phosphore et potasse apportés à la dose optimale.

— Amendement calcaire : dose adaptée au besoin du sol de chaque essai.

— Récolte : début floraison.

Deux facteurs ont gêné l'utilisation de ces essais :

— La date de semis tardive pour certains d'entre eux (l'expérimentateur étant entré en fonction le 15 avril).

— La forte pluviosité de l'année qui a provoqué l'envahissement par les plantes adventices, et a donc diminué la précision des essais, rendu difficile les analyses d'azote et a parfois rendu impossible toute pesée.

L'ensemble des conclusions sera tiré dans 3 ans, mais 8 essais ont déjà fourni des renseignements importants et qu'il nous a semblé utile de dégager dès maintenant.

II. — Les résultats

a) *Essai de Marcenat* (Cantal)

Essai effectué dans le domaine du SEI.

Objet :

Essai d'implantaton de luzerne dans un sol acide mais riche et profond.

Caractéristique du terrain.

— Altitude : 1 070 m.

— Sol basaltique, argileux, riche en matière organique (défriche de pacage en 1962).

— Analyse chimique (p. 1 000).

pH (Cl_2Ca)	5,4
Azote total	3,84
Calcaire total	traces
Ca échangeable	1,50
Mg échangeable	0,51
P_2O_5 assimilable	0,14
K_2O assimilable	0,52

— Profondeur du sol : meuble sur 30 cm.

— Sous-sol : terre et lits de cailloux pénétrables par les racines de luzerne sur un mètre.

pH (Cl_2Ca)	5,35
Calcaire total	2,0
Ca échangeable	0,90
Mg échangeable	0,37

Évolution de l'essai.

— 1er juin 1963 : semis

— 15 juillet : apparition de différence de couleur dans le feuillage.

Parcelle A et B (témoins).	vert clair
Parcelle C (inoculées)....	vert foncé

— 23 juillet : 1re coupe (cf. tabl. 1).

Parcelle A et B	taille 52-67 cm, vert clair.
Parcelle C.....	taille 60-62 cm, vert foncé.

Dans tout ce qui suit :

A : désigne le témoin humidifié.
B : désigne le traitement par les bactéries tuées.
C : désigne le traitement par les bactéries vivantes.

— 9 octobre 1963 2e coupe.

Parcelle A et B :	taille 25 cm, vert jaunâtre
Parcelle C.....	taille 35 cm, vert sombre

Rendement moyen en matière verte pour la 2e coupe en t / ha:

Traitement A	6,70
Traitement B	6,16
Traitement C	17,32
p.p.d.s.	2,82

— Novembre 1963 : coupe de régularisation après les premières gelées (rendement insignifiant).

Résultats.

Dans ce sol acide mais riche et chaulé (600 U/ha de CaO) :

— l'inoculation a produit une augmentation de rendement de 30 p. 100 (en matière sèche) ;

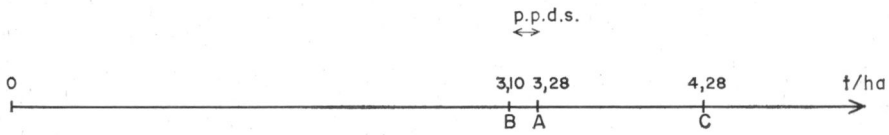
— le traitement a provoqué un retard de végétation (pourcentage plus faible de matière sèche) ;

TABLEAU I

1ere coupe *Marcenat*

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.
Traitement A	100	210	100
Traitement B.....	96,1	206	94,5
Traitement C.....	144,7	189	130,4
Valeur de la p.p.d.s. (à 0,05)..	5,9	8	5,5
Test F.....	H.S.	H.S.	H.S.
Valeur de 100 en t/ha	15,55		3,28

1ere coupe : matière sèche



— les parcelles non inoculées, faiblissent progressivement. La déficience des *Rhizobium* spécifiques est donc très forte.

— le rendement en vert pour cette première année est de 40 t/ha (l'opinion des techniciens agricoles locaux permettra de définir dans 3 ans si la culture de la luzerne doit être développée dans cette région).

b) *Essai de Ceyssat* (Cantal)

Essai effectué avec le F. P. A. de Rochefort-Montagne.

Objet :

Implantation de luzerne dans un sol très pauvre et légèrement acide.

Caractéristiques du terrain.

— Altitude : 960 m.

— Sol silico-humifère comportant quelques cailloux basaltiques : défriche de prairie de montagne en 1960.

— Analyse chimique, p. 1 000.

pH (Cl_2Ca)	6,3
Azote total	3,29
Calcaire total	4,0
Ca échangeable	1,22
Mg échangeable	0,19
P_2O_5 assimilable	0,03
K_2O assimilable	0,02

— Profondeur du sol : meuble sur 50 cm.
Sous-sol : Pouzzolane et cailloux pénétrables par les racines au moins jusqu'à 1 m.

pH (Cl_2Ca)	5,8
Ca total	5,5
Ca échangeable	1,26
Mg échangeable	0,17

Évolution de l'essai.

— 24 mai 63 : semis

Jusqu'au 25 juillet pas de différence de taille ni de couleur entre les parcelles.

— 1er août.

Parcelles A et B	taille 30 cm, couleur vert pâle.
Parcelle C	taille 40 cm, couleur vert foncé.

— 20 août : début floraison, 1re coupe (cf. tabl. 2).

Parcelles A et B	taille 35 cm, couleur vert pâle.
Parcelle C	taille 50 cm, couleur vert foncé.

— 10 octobre : 2e coupe.

Parcelles A et B	taille 7 à 8 cm, couleur jaune pâle.
Parcelle C	taille 15 à 20 cm, couleur vert foncé.

Rendement moyen en matière verte pour la 2e coupe en t /ha.

Traitement A	2,26
Traitement B	2,34
Traitement C	5,12
p.p.d.s.	0,70

Résultats.

Dans ce sol riche en azote mais par ailleurs très pauvre, l'inoculation a produit une augmentation de rendement de 76 p. 100 par rapport au témoin.

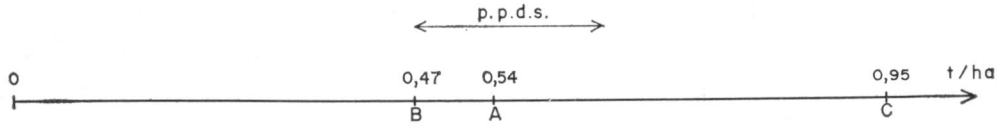
La luzerne a pris un bon départ (9,34 t/ha en vert pour cette première année), ce qui semble un résultat encourageant pour ce sol.

TABLEAU 2

1re coupe *Ceyssat*

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.
Traitement A	100	226	100
Traitement B.....	85,8	225	86,7
Traitement C.....	175,8	225	174,8
Valeur de la p.p.d.s., (à 0,05) ..	36,6	12	36,1
Test F.....	H.S.	N.S.	H.S.
Valeurde 100 en t/ha	2,40		0,542

1ere coupe : matière sèche



c) *Essai de Saint-Pierre-Duchamp* (Haute-Loire)

Essai effectué en relation avec l'expérimentateur de la Chambre d'Agriculture.

Objet :

Culture de luzerne dans un sol granitique où la luzerne vient « très mal ».

Caractéristiques du terrain.

— Altitude : 960 m.
— Sol : arène granitique.
— Analyse chimique. p. 1 000.

pH (Cl_2Ca).....	5,9
Azote total	1,48
Calcaire total	nul
Ca échangeable	1,02
Mg échangeable	0,29
P_2O_5 assimilable	0,15
K_2O assimilable	0,34

Évolution de l'essai.

— 23 mai 1963 : semis.

— 24 août 1963 : 1er coupe (tabl. 3)

Parcelles A et B : la luzerne est jaune et ne dépasse pas 5 à 6 cm, elle n'est donc pas récoltable ; les parcelles sont envahies par la matricaire.

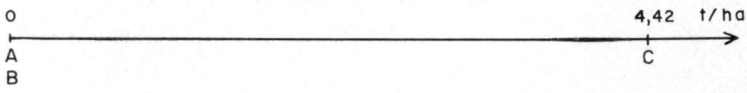
Parcelles C : taille 58 à 62 cm, luzerne vert foncé.

TABLEAU 3

1re coupe *Saint-Pierre-Duchamp*

	Rendement en vert en t/ha	Matière sèche p. 1 000	Rendement en M.S.
Traitement A	insignifiant		insignifiant
Traitement B.....	insignifiant		insignifiant
Traitement C.....	17,86	249	4,42

1ere coupe : matière sèche



— 4 novembre : 2e coupe.

Parcelles A et B : pratiquement pas de repousse
Parcelles C : 6,68 t/ha en vert.

— Décembre : coupe de régularisation après les premières gelées, (rendement insignifiant).

Résultats.

Dans cette arène granitique acide, le résultat de l'inoculation est spectaculaire.

— Les parcelles non inoculées ont pratiquement dépéri après la première coupe, malgré le chaulage (450 U/ha).

— Les parcelles inoculées ont donné un rendement intéressant (25 t en vert pour cette première année).

Le sol ne contenait pas de *Rhizobium meliloti.*

d) *Essai de Lopérec* (Finistère)

Effectué en relation avec le technicien de la Chambre d'Agriculture.

Objet :

Implantation de luzerne dans un terrain n'ayant jamais porté cette culture.
Sol originellement acide mais chaulé régulièrement et riche en matière organique.

Caractéristiques du terrain. (p. 1 000)

pH (Cl_2Ca)	5,7
Azote total	3,70
Ca échangeable	2,70
Mg échangeable	0,31
P_2O_5 assimilable	0,47
K_2O assimilable	0,62

— Profondeur du sol : 20 cm.

— Sous-sol : schistes de Chateaulin fendillés, pénétrables par les racines.

Évolution de l'essai.

— 8 mai : semis.

Aucune différence visible entre les parcelles A, B et C pendant toute l'année.

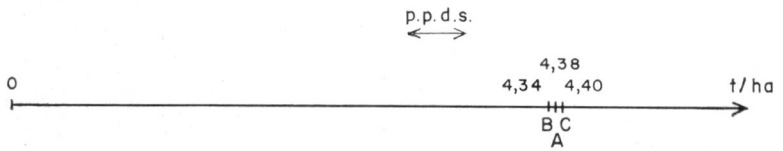
— 9 août : 1re coupe (cf. tabl. 4).

TABLEAU 4

1re coupe *Lopérec*

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.
Traitement A	100	170	100
Traitement B.....	104,7	160	99,1
Traitement C	99,2	173	100,4
Valeur de la p.p.d.s, (à 0,05) ...	7,8	11	7,8
Test F.....	N.S.	N.S.	N.S.
Valeur de 100 en t/ha	25,8		4,38

1ere coupe : Matière sèche



— 17 octobre : 2e coupe.

Rendement moyen en matière verte.

Traitement A	10,8 t/ha.
Traitement B	11,1 t/ha.
Traitement C	10,9 t/ha.

(différence non significative.)

Résultats.

L'inoculation n'a produit aucun effet. Les *Rhizobium meliloti* sont donc présents dans ce sol qui n'a cependant jamais porté de luzernière. Ils se sont développés grâce aux chaulages répétés (1 à 1,5 t de CaO/ha, tous les 4 ans depuis 30 ans) et à la richesse du sol en matière organique (8 t/ha de fumier tous les 4 ou 5 ans).

e) *Essai de Marigny-en-Orxois* (Aisne)

(Effectué en relation avec le C.E.T.A. de Neuilly-Saint-Front).

Objet :

Culture de luzerne dans un sol défavorable. Ce terrain est situé au milieu d'une région où la luzerne donne d'excellents rendements.

Caractéristiques du terrain.

— Sol : limon silico-argileux avec forte battance en surface.
— Analyse chimique (p. 1 000)

pH (Cl_2Ca)	6,85
Azote total	0,67
Calcaire total	traces
Ca échangeable	1,16
Mg échangeable	0,17
P_2O_5 assimilable	0,08
K_2O assimilable	0,12

— Profondeur du sol pénétrable par les racines, supérieure à 1 m.
— Sous-sol (p. 1 000)

pH (Cl_2Ca)	7,8
Ca échangeable	0,68
Mg échangeable	0,16

Évolution de l'essai.

— 17 mai 1963 : semis.
— 24 juin.

Parcelles A et B : couleur vert jaune.
Parcelles C : couleur vert.

— 19 juillet.

Parcelles A et B : couleur vert-jaune, taille 12-15 cm.
Parcelles C : couleur vert franc, taille 32-40 cm.

Peuplement trois fois plus élevé dans la parcelle C que dans les parcelles A et B (photo 5).

Présence de nodules groupés (par 4 ou 5) sur les racines des plantes provenant des parcelles A et B et nodules dispersés sur celles provenant des parcelles C.

— 11 septembre : 1re coupe (tabl. 5).

Petite différence de taille en faveur de l'inoculation.

FIG. 5. — *Marigny-en-Orxois* (Aisne)

(Cliché OBATON)

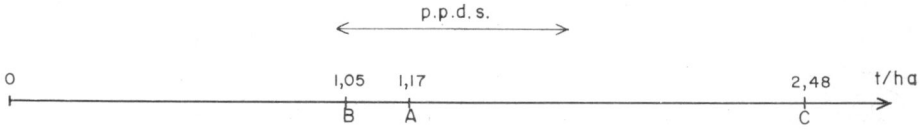
Au centre, on distingue les deux lignes de luzerne semées dans l'allée entre les parcelles.
A gauche, parcelle non inoculée, végétation chétive, peuplement faible, couleur jaune du feuillage.
A droite, parcelle inoculée, végétation correcte.
Photo prise deux mois après le semis, sol de limon battant non acide.

TABLEAU 5

1ere coupe *Marigny en Orxois*

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.
Traitement A	100	189	100
Traitement B.....	86,4	196	89,5
Traitement C.....	210,6	191	212,8
Valeur de la p.p.d.s, (à 0,05) ...	40,0	11	45,3
Test F.....	H.S.	N.S.	H.S.
Valeur de 100 en t/ha	6,20		1,17

1ere coupe : Matière sèche



Résultats.

Dans ce sol battant, les *Rhizobium meliloti* sont peu nombreux ou peu actifs.

L'augmentation de rendement due à l'inoculation est de 113 p. 100. Ce fait est particulièrement remarquable, car imprévu, dans ce sol non acide de l'Aisne. Il est possible que le sol battant crée un milieu asphyxiant peu favorable au développement des bactéries de la luzerne.

L'inoculation est nécessaire si l'on veut introduire une luzerne dans ce sol.

f) *Essais de La Minière* (Seine-et-Oise)

Effectué sur le terrain du Service d'Expérimentation de l'I. N. R. A.

Objet :

Sur un sol où la culture de la luzerne donne d'excellents résultats, comparaison de 4 souches de *Rhizobium meliloti.*

Caractéristiques du terrain.

— Sol : limon de plateaux battant.

— Analyse chimique (p. 1 000).

pH (Cl_2Ca)	6,0
Azote total	0,92
Calcaire total	traces
Ca échangeable	1,96
Mg échangeable	0,14
P_2O_5 assimilable	0,15
K_2O assimilable	0,18

— Profondeur du sol pénétrable par les racines à plusieurs mètres.

— Sous-sol (p. 1 000) :

pH	6,85
Calcaire total	traces
Ca échangeable	2,40
Mg échangeable	0,14

Évolution des essais.

A. *Essais de* 1962.

— 4 mai 1962 : semis : carré latin 5 × 5.

1. témoin.
2. inoculation avec la souche *Sn 258* inefficace (Rothamsted 3).
3. inoculation avec la souche *Sa 10* efficace (Eure).
4. inoculation avec la souche *PL 1* efficace (Finistère).
5. inoculation avec la souche *PL 2* efficace (Finistère).

— Jusqu'au 15 août, les parcelles inoculées avec la souche inefficace *Sn 258* sont plus jaunes. Mais aucune différence de couleur ni de taille n'est visible entre le témoin et les autres traitements.

— Juillet : coupe de régularisation.

— 21 septembre : 2e coupe (cf. tabl. 6), le rendement est faible à cause de l'été très sec.

1963 : aucune différence visible à l'œil ; aucune différence de rendement.

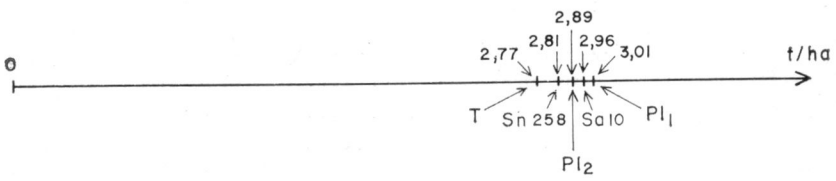
6 juin 63 : 1re coupe (cf. tabl. 7).
11 juillet : 2e coupe (cf. tabl. 7).
2 septembre : 3e coupe (cf. tabl. 7).

TABLEAU 6

La Minière
Essai 1962 — Récolte 1962

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.	Teneur en N % de la M.S.
Témoin	100	287	100	2,77
Souche *Sn 258*	105,4	267	101,5	2,77
Souche *Sa 10*	108,6	284	107,0	2,86
Souche *PL 1*	107,4	291	108,5	2,72
Souche *PL 2*	103,6	290	104,3	2,70
Valeur de la p.p.d.s. (à 0,05) .	N.S.	6	N.S.	N.S.
Valeur de 100 en t/ha	7,9		2,27	

2e coupe : Matière sèche



B. *Essai de* 1963.

Semis.

1. témoin.
2. inoculation avec la souche *Sn 258* inefficace (Rothamsted).
3. inoculation avec la souche *Sa 10 M* mutant inefficace de la souche *Sa 10* efficace.
4. inoculation avec la souche *Sa 10* très efficace (Eure).
5. inoculation avec la souche *PL 1* très efficace (Finistère).
6. inoculation avec la souche *PL 2* très efficace (Finistère).

— Aucune différence végétative n'est visible à l'œil pendant toute l'année (photo 6).

— Juillet : coupe de régularisation.

— 2 septembre (cf. tabl. 8).

TABLEAU 7

La Minière
Rendement en matière sèche
Essai 1962 — Récolte 1963

	Rendement relatif de la 1re coupe	Rendement relatif de la 2e coupe	Rendement relatif de la 3e coupe	Rendement relatif total annuel
Témoin	100	100	100	100
Souche *Sn 258*	102,1	98,1	103,0	101,1
Souche *Sa 10*	102,1	98,1	101,7	101,1
Souche *PL 1*	98,5	96,5	97,6	97,7
Souche *PL 2*	102,3	98,4	104,1	101,5
p.p.d.s. (à 0,05)	N.S.	N.S.	N.S.	N.S.
Valeur de 100 en t/ha ...	6,57	3,74	2,96	13,27

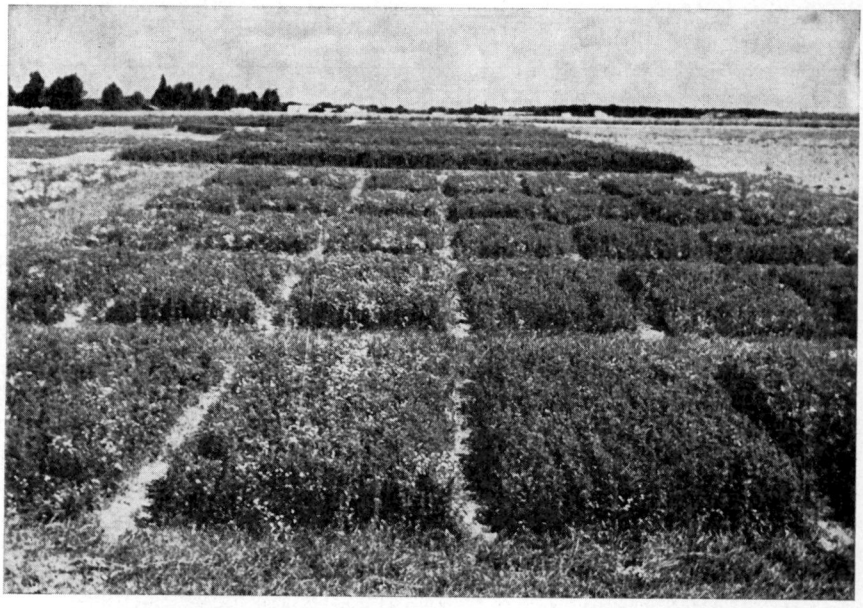


FIG. 6. — *La Minière* (Seine-et-Oise)
(Cliché OBATON)

Aucune différence de végétation n'est visible entre les parcelles témoins inoculées avec diverses souches. Cependant, la souche Sa 10 a provoqué une augmentation de rendement de 22 p. 100 sur le poids de matière sèche.
Photo prise deux mois après le semis — sol de limon battant.

Résultats.

a) *Traitement avec les souches efficaces.*

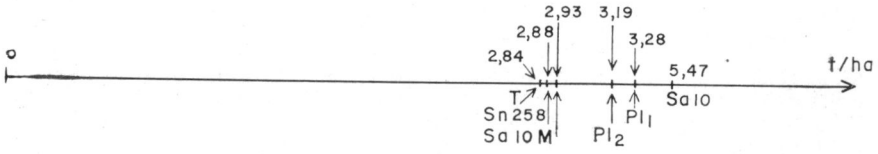
L'inoculation effectuée sur le semis de 1962 n'a produit aucun effet significatif mais une tendance nette en faveur de la souche *Sa 10* et *PL 1*. Les rendements totaux en vert (77 t/ha en 1963) confirment que la luzerne donne d'excellents résultats dans ce sol.

TABLEAU 8

2e coupe *La Minière*
Essai 1963

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.	Teneur en N ‰ de la M.S.
Témoin	100	22,3	100	33,0
Souche *Sn 258*.....	97,9	23,0	101,3	33,2
Souche *Sa 10 M*.....	101,8	22,5	103,0	32,3
Souche *Sa 10*.....	120,6	22,3	122,2	32,6
Souche *PL 1*.....	115,3	22,4	115,4	32,1
Souche *PL 2*.....	112,5	22,4	112,4	31,3
Valeur de la p.p.d.s (à 0,05) ..	19,4	N.S.	9,0	N.S.
Valeur de 100 en t/ha	12,77		2,84	

2e coupe : Matière sèche



L'inoculation effectuée sur le semis 1963 a produit un effet significatif : augmentation de rendement de 22 p. 100, avec la souche *Sa 10*, par rapport au témoin. Ce résultat est particulièrement important puisqu'il concerne une région de culture traditionnelle de la luzerne.

L'action des souches *Sa 10, PL 1, PL 2* ne saurait être due à une efficacité supérieure à celle de la souche autochtone, sinon il y aurait également eu une augmentation de rendement en 1962 et le taux d'azote serait plus élevé. Il est donc très probable que le résultat positif de l'essai semé en 1963 vient d'une insuffisance numérique des *Rhizobium* cette année-là. Il faut noter que l'hiver 1962-63 a été très froid, et que le printemps très humide a augmenté la battance naturelle du sol. Des essais seront poursuivis pour déterminer si le froid ou la mauvaise structure du sol peuvent détruire les *Rhizobium meliloti* dans le sol.

b) *Traitement avec les souches inefficaces.*

Ces souches ne sont pas compétitives, elles provoquent un léger retard dans la végétation parfois visible à l'œil en début de culture et décelable à la récolte par un pourcentage plus faible en matière sèche.

g) *Essai de Vitry-le-François* (Marne)

(Effectué en relation avec l'ingénieur du C. E. T. A. de Champagne.)

Objet :

Essai d'implantation de luzerne dans un sol calcaire n'ayant jamais porté cette culture (défriche de pins).

Caractéristiques du terrain.

— Sol crayeux (défriché récemment).
— Analyse de sol (p. 1000).

pH (Cl_2Ca)	8,05
Azote total	1,85
Calcaire total	5,83
Ca échangeable	8,16
Mg échangeable	0,36
P_2O_5 assimilable	0,12
K_2O assimilable	0,11

— Profondeur du sol : meuble sur 20 cm puis « graveluche » (terre et craie mélangées).
— Sous-sol : à 40 cm, craie tendre fissurée.

Observations en culture.

— 23 juin 1963 : semis.
— 10 septembre : végétation correcte mais coloration un peu pâle des feuilles sur tout l'essai. En observant l'essai attentivement, on peut reconnaître 6 parcelles inoculées sur les 8 à cause de leur végétation légèrement supérieure.
— 4 octobre 63 : première coupe (tabl. 9).
Les différences signalées lors de la dernière visite sont atténuées. A ce moment, les racines atteignent 38 à 45 cm de profondeur.

Résultats.

— Ce sol basique n'a jamais porté de luzerne, mais des *Medicago* poussaient spontanément dans le sous-sol.
— D'après la coloration du feuillage pendant les trois premiers mois, l'inoculation semble avoir produit un léger effet bénéfique.
Le nombre des *Rhizobium* est donc peut-être un peu trop faible dans la couche superficielle (la vie microbienne a été perturbée par le défrichage).
— L'inoculation n'a pas produit d'augmentation de rendement significative.

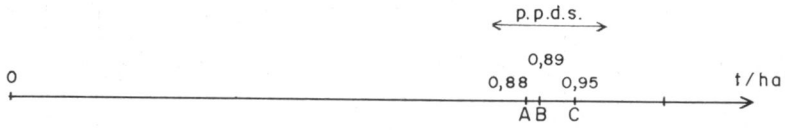
Les *Rhizobium meliloti* se trouvent naturellement en abondance dans les sols calcaires (présence de nombreux nodules sans inoculation) mais la culture de la luzerne ne semble pas devoir être rentable dans ce sol.

TABLEAU 9

1re coupe *Vitry-le-François*

	Rendement relatif en vert	Matière sèche p. 1 000	Rendement relatif en M.S.
Traitement A	100	264	100
Traitement B.....	110	250	102
Traitement C.....	112	246	108
Valeur de la p.p.d.s., (à 0,05) ...	25	24	19
Test F.....	N.S.	N.S.	N.S.
Valeur de 100 en t/ha	3,28		0,876

1ere coupe : Matière sèche



CONCLUSIONS DES ESSAIS PRÉCIS

Ces essais confirment les conclusions des essais de comportement.

De plus, parmi les cinq points principaux qui ont été définis comme objet de cette expérimentation, trois peuvent être éclairés par cette première année de culture :

Point 1 : l'action de l'inoculation est uniquement dûe au rôle des bactéries vivantes puisque le traitement par le produit stérilisé n'a jamais donné lieu à une différence significative par rapport au témoin.

Point 3 : l'inoculation peut avoir un intérêt dans les régions de culture traditionnelle de la luzerne (22 p. 100 d'augmentation de rendement en S. et O.).

Point 5 : les facteurs intervenant dans la vie du *Rhizobium* dans le sol comportent des éléments nouveaux qui méritent une analyse précise (tabl. 10).

En comparant la composition des divers sols, et les réponses que ces essais ont donné à l'inoculation, on peut formuler les hypothèses suivantes :

— Il n'y a aucune relation entre la présence de *Rhizobium meliloti* dans un sol et sa richesse en phosphore et en potasse.

TABLEAU IO

Nature du sol et action de l'inoculation

	Nature du sol					Résultat de l'inoculation	
	Richesse en						
	Nature	pH	P_2O_5 ass.	K_2O ass.	Ca échangeable p. 1 000	Augmentation du rendement par rapport au témoin sur M.S.	Rendement total de l'année (en t/ha M.S.)
Marcenat (Cantal)	Basaltique	5,4	moyen	riche	0,90	45 %	40
Ceyssat (Puy-de-Dôme)	Pouzolane	6,3	pauvre	pauvre	1,22	76 %	9
Saint-Pierre Duchamp (Haute-Loire)	Arène granitique	5,9	moyen	riche	1,02	témoin disparu	25
Lopérec (Finistère)	Schistes (chaulés)	5,8	riche	riche	2,70	non significatif	37
Marigny-en-Orxois (Aisne)	Limon battant	6,9	pauvre	pauvre	1,16	113 %	—
La Minière (S.-et-O.) 1962	Limon battant	6,7	riche	riche	traces	non significatif	—
La Minière essai 1963	Limon battant	6,7	riche	riche	traces	22 %	—
Vitry Le François (Marne)	Crayeux	8,1	moyen	pauvre	8,16	non significatif	—

— Il y a très fréquemment une relation entre l'acidité du sol et le manque ou l'insuffisance de *Rhizobium*.

Cependant, des facteurs secondaires viennent compliquer cette question :

— En sol acide, si les chaulages sonte ffectués régulièrement depuis plusieurs années, les *Rhizobium meliloti* peuvent se multiplier dans le sol et devenir capables de former un nombre suffisant de nodules pour que l'inoculation soit inutile (essai de Lopérec). Dans ce cas, on observe que le taux de calcium échangeable dépasse 2 p. 1 000. Des analyses de calcium échangeable seront effectuées systématiquement pour vérifier si cette hypothèse est juste.

— En sol neutre, l'inoculation peut être utile (essai de La Minière).

— Dans un sol riche en calcaire, les *Rhizobium meliloti* vivent spontanément même si la luzerne n'y a jamais été cultivée (essai de Vitry-le-François).

— Dans une terre battante, le nombre des bactéries actives peut être insuffisant (essai de La Minière, de Marigny-en-Orxois). Les facteurs qui influent sur la survie des bactéries dans le sol ne sont pas encore déterminés, mais l'action des facteurs climatiques doit être envisagée.

De nouveaux essais seront mis en place dans les années à venir pour vérifier ces hypothèses. De plus, l'analyse de nouveaux facteurs sera entreprise (influence des facteurs climatiques et de la structure du sol sur le nombre des *Rhizobium meliloti* dans le sol, survie après une première inoculation).

V. — CONCLUSION GÉNÉRALE

L'importance de l'inoculation de la luzerne est aussi grande en France que dans les pays étrangers qui la pratiquent depuis plusieurs dizaines d'années. Mais elle n'est cependant pas nécessaire dans toutes les régions.

Actuellement, on peut dire qu'il est possible de faire venir une luzernière, et que celle-ci se maintienne plusieurs années, dans tous les sols, pourvu qu'ils soient assez profonds. Ceci implique que l'épaisseur pénétrable par les racines soit suffisante (absence de roche compacte, de semelle de labour ou de nappe d'eau près de la surface). De plus, il est très important que les façons culturales, la fumure et l'amendement, le mode d'exploitation, soient corrects (DEMARLY, 1961).

L'inoculation peut être raisonnablement conseillée systématiquement lorsque l'on veut établir une luzernière en sol acide, chaulé depuis peu, car les *Rhizobium meliloti* sont absents ou incapables de former des nodules (pour les autres conditions nécessaires à la réussite de la luzerne en sol acide, voir GACHON, 1962).

Dans tous les cas où la luzernière reste chétive ou se dépeuple, il est bon de faire un essai pour voir si cela n'est pas dû à une déficience en bactéries spécifiques.

Enfin, dans les terres où la luzerne donne naturellement de bonnes récoltes, l'inoculation peut conduire à une augmentation rentable de rendement, mais les facteurs intervenant dans la vie des *Rhizobium meliloti* dans le sol sont encore trop mal connus pour qu'il soit possible de prévoir ces cas.

L'expérimentation rapide mais peu précise que nous avons entreprise en 1959 nous a donc permis de montrer l'importance primordiale de l'inoculation dans la culture de la luzerne et de pouvoir conseiller les utilisateurs.

Les essais précis entrepris à partir de 1963 permettent d'étudier plus finement le problème au point de vue microbiologique et agronomique.

Nous souhaitons que ces renseignements sur les possibilités de l'inoculation puissent orienter efficacement les agriculteurs. La rapidité avec laquelle cette technique se développe en France, nécessitait, nous semble-t-il, cette mise au point.

Reçu pour publication en février 1965.

REMERCIEMENTS

Nous sommes reconnaissant à J. ARNOUX, chef du Service de Biométrie, d'avoir effectué des analyses statistiques des résultats et à L. FÉLIX, chef du Service d'Expérimentation de La Minière, d'avoir effectué et interprété deux essais.

Nous remercions également tous ceux qui ont suivi, contrôlé et entretenu les essais.

SUMMARY

THE INOCULATION OF LUCERNE
II. EXPERIMENTAL RESULTS

In this second article on the inoculation of Lucerne seed, results of field experiments are reported. A large number of trials showed that the inoculation of Lucerne is :

— indispensable in the acid soils of Brittany, the Central Massif and the Vosges;

— often effective in the decalcified soils of Normandy, the Atlantic Coast, the border region of the Central Massif and the Jura.

A second serie of trials involved precise analysis in block experiments with right repetitions, undertaken with a view to determining the exact increase in yields due to inoculation, and to investigating the factors that allow to forecast the presence of *Rhizobium meliloti* in the soil.

Experimental results with one culture of Lucerne showed :

— yield of 25 t green matter on treated plots and total failure on control plots of acid granitic sand,

— yield increases of 76-45 p. 100 on acid volcanic soil,

— yield increase of 22 p. 100 on loam soil suitable for Lucerne.

There were, on the other hand, no significant effects on a calcareous soil that had never carried Lucerne, and on acid soil receiving regular applications of lime.

Results show the importance of lime for the survival of *Rhizobium* in soil, and also the action of other factors such as possible soil structure and climate.

ZUSAMMENFASSUNG

IMPFUNG DER LUZERNE

Diese zweite Abhandlung über Impfung der Luzernesamen berichtet über Feldversuche.

In einer ersten Etappe wurden sehr zahlreiche Verhaltensversuche ausgeführt. Diese zeigten, dass :

— die Impfung der Luzerne in den sauren Böden der Bretagne des Zentralgebirges und der Vogesen unerlässlich ist ;

— sie in den dekalzifizierten Böden der Normandie, Atlantiküste und den Randzonen des Zentralgebirges und des Jura nützlich ist.

In einer zweiten Etappe wurden genaue Untersuchungen der Blockversuche mit 8 Wiederholungen unternommen.

Zweck dieser Versuche war die genaue Bestimmung der Ertragserhöhung infolge Impfung und derjenigen Faktoren, die die Gegenwart von *Rhizobium meliloti* im Boden voraussehen lassen.

Nach einem Jahr waren die Ergebnisse der Versuche folgende :

— 25 T Grünmasse in den behandelten Parzellen und vollständiges Verschwinden der Kontrolle auf saurem Granitsand.

— 76 und 45-prozentige Erhöhung des Ertrags auf saurem Vulkanboden.

— 113 p. 100 Ertragserhöhung auf nicht saurem, zusammenschlagendem Lehmboden.

— 22 p. 100 Ertragserhöhung auf für Luzerne günstigem Lehmboden.

Auf Kalkböden hingegen, die nie keine Luzerne trugen, und auf regelmässig gekalktem saurem Boden war die Wirkung keine besondere.

Dies bestätigt die wichtige Rolle des Kalks für das Leben der *Rhizobia* im Boden, und beweist desgleichen dass andere Faktoren einwirken, so etwa Bodenstruktur und Klima.

Инокуляция люцерны.

М. ОБАТОН, Г. БЛАШЭР,

РЕЗЮМЕ

Эта вторая статья по поводу инокуляции семян люцерны представляет отчет о полевых опытах в грунтовой почве.

Были поставлены многочисленные опыты для наблюдений за поведением инокулированной люцерны — в качестве первого этапа. Исследования эти показали, что инокуляция :

— Необходима в кислых почвах Бретани, Центрального Массива и Вогезов.

— Часто приносит пользу в декальцифицированных почвах Нормандии, побережья Атлантического Океана, пограничных с Центральным Массивом районов, Юры.

Точные анализы проведенные при помощи опытных блоков состоящих из 8-ми повторностей — представляли второй этап.

Цель этих опытов — точное определение увеличения урожайности вызванное инокуляцией и установление факторов указывающих на возможность присутствия, *Rhizobium meliloti*, в почве.

Опыты эти дали, по истечении года, следующие результаты :

— 25 тонн/га сырого веса с делянок несших люцерну полученную из семян подвергшихся обработке и полное исчезновение контрольных культур на кислом гранитическом песке.

— 76 и 45 % увеличения урожая на кислой вулканической почве.

— 113 % увеличения урожая на не кислом суглинке покрытом корой.

— 22 % увеличения урожая на суглинке подходящем для люцерны.

И напротив, на никогда не носившей люцерны известковой почве, также как и на кислой, подвергавшейся регулярным известкованиям почве, не наблюдалось сколько-либо значительного эффекта.

Это подтверждает значение кальция для жизни *Rhizobium* в почве и доказывает что и другие факторы играют также значительную роль. Действие почвенной структуры и климата должны быть приняты во внимание.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLACHÈRE H., 1959. L'inoculation des semences de luzerne. *Bull. des C.E.T.A.* Étude nº 383.

DEMARLY Y., 1961. La physiologie de la croissance en vert chez la luzerne. Son incidence sur le mode d'exploitation. *Bull. des C.E.T.A.* Étude nº 542.

GACHON L., 1962. Les principales causes des échecs rencontrés sur luzernière. *Bull. C.E.T.A.* Étude nº 713.

OBATON M., BLACHÈRE H., FERRY P., 1959. L'inoculation de la luzerne. 1re partie : sélection de souches bactériennes. *Ann. agron.*, **10**, 69-76.

OBATON M., BLACHÈRE H., 1963. Observation sur l'inoculation des Légumineuses en France. *Ann. Inst. Pasteur*, **105**, 282-290.

SCHULTZ J. S., GADEN E. L., 1956. Sulfite oxidation as a measure of aeration effectiveness. *Ind. Eng. Chem.*, **48**, 2209-12.

Ann. agron., 1965, **16** (1), 53-89.

UN TERROIR DE TRANSITION EN SEINE-MARITIME LE PETIT CAUX

E. JOUIS et Marie-Thérèse LECACHEUX
avec la collaboration technique de Françoise MORTAIN
Station agronomique, Rouen (Seine-Maritime)

SOMMAIRE

Après un rappel historique destiné à bien situer l'origine et l'extension de la région aujourd'hui dénommée Petit-Caux, les auteurs donnent un aperçu sur la formation géologique de ce plateau et fournissent quelques précisions sur la nature du sous-sol profond (argile ou bief à silex...) si important pour l'économie de l'eau, ainsi que sur d'autres restes des formations tertiaires ayant pu intervenir dans la pédogenèse.

L'étude principale porte sur le limon superficiel, directement ou indirectement d'origine éolienne, lequel a été exploré par une série de sondages, profonds d'environ 1,20 m, situés sur 4 traversées perpendiculaires à la mer.

Après une description rapide des profils de chaque traversée, basée principalement sur les analyses granulométriques aux différentes profondeurs, les auteurs résument leurs constatations et comparent les possibilités du terroir aux cultures historiques, aux cultures actuelles et aux tendances d'avenir.

INTRODUCTION

Entre le Pays de Caux proprement dit et la Plaine Picarde, s'insère le long de la mer un pays de limon des plateaux qui n'avait jamais été étudié au point de vue pédologique et agronomique.

Or l'une des tâches des Stations agronomiques situées en province est de faire l'inventaire de tous les terroirs de France et de reconnaître scientifiquement leurs possibilités agronomiques.

Une conséquence plus détaillée et plus précise d'un terroir entraîne toujours une possibilité de produire à meilleurs prix pour les agriculteurs de cette région, par l'influence des Conseillers agricoles, aptes à traduire en conseils concrets les résultats des recherches effectuées par les Stations de l'Institut national de la Recherche agronomique.

C'est dans cet esprit que nous présentons ci-après cette contribution à la connaissance du Petit-Caux.

ORIGINE DU PETIT CAUX: QUELQUES FLUCTUATIONS HISTORIQUES

Jules SION ; dans *les paysans de la Normandie orientale* (1909) a résumé nos connaissances historiques sur le Pays de Caux et ses limites.

Comme pour presque toutes les régions naturelles, les limites du Caux sont assez floues. Elles ne sont pas uniquement basées sur des considérations géologiques ou pédologiques ou climatiques ou même sociales, mais elles ont très largement varié en fonction d'impératifs religieux et politiques.

Le centre de Pays de Caux proprement dit peut se situer à Yvetot. Le territoire de la peuplade gauloise qui l'habitait, les Calètes, ne venait pas, à l'est, jusqu'à Rouen mais en était séparé par d'importantes forêts dont les massifs de Roumare, de la Forêt-Verte, d'Eawy sont les derniers restes. Par contre, il devait déborder le méridien de Rouen, au N-E. et toucher Dieppe.

Aux époques mérovingiennes et carolingiennes la limite Est du *pagus Catelus* était le *pagus Tellaus*, qui a essayé dernièrement de reparaître comme minuscule région naturelle sous l'appellation de Tallou, d'après le nom de la Béthune qui s'appellait alors la Tellas.

Ce Tallou était une région de bois et de clairières traversée par la Varenne et la Béthune.

Sa limite avec le *pagus Caletus* était fixée, suivant les diplômes et les Chartes, tantôt à la Scie, tantôt à la Saâne ou au Dun, parfois même à la rivière de Fécamp, ce qui restreignait alors considérablement le futur Pays de Caux.

Au XIIIe siècle, on relève un archidiaconé du Grand-Caux et un du Petit-Caux. Ce dernier comprend les doyennés de Canville, de Bacqueville et de Brachy. Nous sommes loin de ce que nous entendons aujourd'hui par Petit-Caux.

Mais par ailleurs, la royauté établit une division administrative : le baillage de Caux, qui va s'étendre exagérément à l'est. Sous saint Louis, il absorbe ceux d'Arques, de Neufchâtel et d'Aumale. En 1789, le bailli a juridiction sur tout ce qui forme aujourd'hui la Seine-Maritime, sauf l'arrondissement de Rouen, donc sur un territoire qui dépasse complètement l'ancien établissement des Calètes. En 1665, un intendant écrivait que le Pays de Caux enfermait une petite contrée nommée Pays de Bray. Au XVIIIe siècle, l'ensemble des érudits appelle Pays de Caux l'ensemble des plateaux crayeux de la Seine-Maritime, sauf ceux des alentours de Rouen.

Mais comme la différence entre les plaines fertiles d'Yvetot, de Doudeville... et celles situées à l'est de la Béthune est assez grande, les lettrés se mettent à appeler Petit-Caux l'ensemble de ces dernières.

Antoine PASSY, dans sa description géologique du département de la Seine-Inférieure (*Rouen*, 1832) appelle Petit-Caux tout le plateau situé entre la Béthune et la Bresle, dans sa partie voisine de la mer, bien qu'une telle appellation fut ignorée de la tradition populaire.

La population de ces régions ressentait en effet une affinité picarde.

Par ailleurs, nous avons vu que les doyennés du Petit-Caux étaient situés au Moyen Age à l'Ouest de la Béthune, avec des localités aussi loin de la mer que le sud de Tôtes.

C'est donc une innovation pour PASSY et ses prédécesseurs du XVIIIe siècle d'appeler Petit-Caux le plateau bordant la mer entre Dieppe et le Tréport derrière 30 km de falaise :

Par la suite, ce terme entra peu à peu dans le vocabulaire de ceux qui se sont penchés sur la délimitation des régions naturelles.

Maurice PELLET, ingénieur agronome, qui s'est beaucoup occupé de cette question, a publié peu après la guerre un opuscule sur *les Prairies normandes* avec une carte schématique des régions naturelles.

On peut y voir le Petit-Caux non seulement occuper les plateaux entre Bresles et Béthune depuis la mer jusqu'à une ligne joignant la pointe du Bray (Saint-Waast-d'Équiqueville) à Aumale, mais aussi la région entre Bray et Varenne jusqu'à la source de cette dernière à Saint-Martin-Osmonville.

Cet ensemble nous parait bien disparate. Personnellement, nous préférons appeler Arrière-Caux ou Caux-Est les terrains sis à l'est d'une ligne Dieppe-Tôtes-Rouen = Route nationale n° 27.

Actuellement, la carte des régions naturelles de la Direction des Services agricoles de la Seine-Maritime considère le Petit-Caux comme formé de 3 cantons de Dieppe, Eu, et Envermeu. Dans ces conditions, on arrive a un total cadastral de l'ordre de 48 000 ha (LABOUNOUX et JANNIN, 1923, 48 308 ha).

Le Petit-Caux ainsi conçu comprend une sous-région naturelle qui est l'Aliermont ainsi que quelques communes de transition, le tout formant une sorte de triangle avec base au sud d'Envermeu et pointe sur la commune de Ricarville-du-Val. Ce triangle présente une superficie de 10 781 ha.

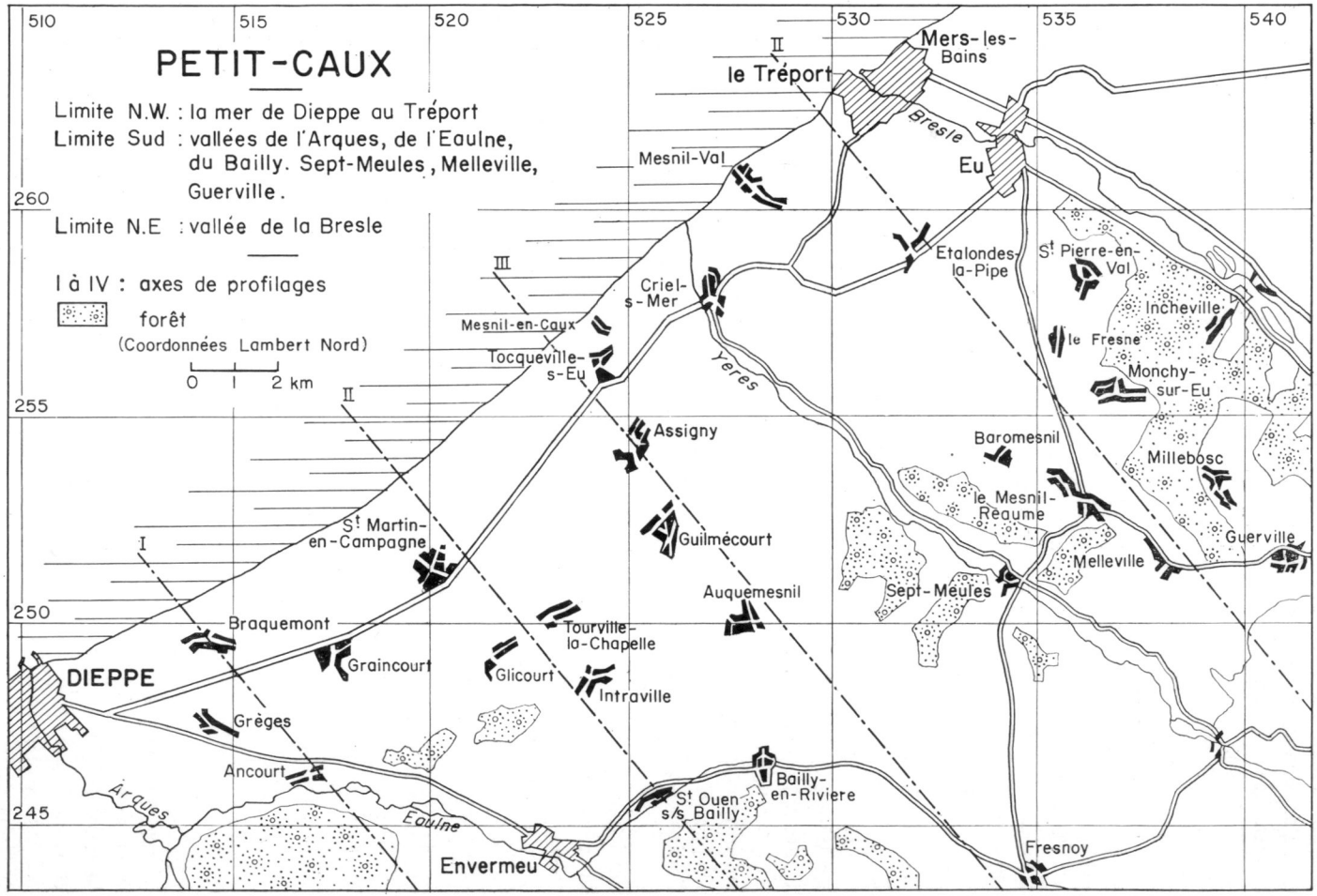
Si l'on retranche ce triangle, qui ne fait pas partie du Petit-Caux tel que nous l'avons défini, et si l'on ajoute la commune de Guerville, dans le canton de Blangy-sur-Bresle, on arrive à un total de 37 511 ha.

Mais il fallait encore tenir compte des communes limitrophes en bordure des vallées, dont une partie seulement du territoire se trouve sur le plateau du Petit-Caux.

En comptant arbitrairement pour moitié la surface de chaque commune limitrophe, on arrive à un total corrigé de 30 964 ha, soit 31 000 ha en chiffres ronds.

DÉLIMITATION DE LA RÉGION ÉTUDIÉE

Dans cette étude, nous appellerons donc Petit-Caux, une petite région très homogène, comprise entre Dieppe et le Tréport en bordure de la Manche et bordée successivement par l'Eaulne (affluent de l'Arques) jusqu'à Envermeu, puis le Bailly (affluent de l'Eaulne) jusqu'à sa source. Ensuite par la départementale 58 de Bailly-en-Rivière à Sept-Meules ; la nationale 314 de Sept-Meules à Mesnil-Réaume et de là à Incheville, sur la Bresle à travers la forêt d'Eu. Enfin, par la Bresle, d'Incheville au Tréport. Nous y ajouterons l'enhachement compris entre Yères et Bresles, jusqu'à Guerville, le prolongeant naturellement (*cf.* carte).


PETIT-CAUX
Limite N.W. : la mer de Dieppe au Tréport
Limite Sud : vallées de l'Arques, de l'Eaulne, du Bailly. Sept-Meules, Melleville, Guerville.
Limite N.E : vallée de la Bresle
I à IV : axes de profilages
forêt
(Coordonnées Lambert Nord)
0 1 2 km
510
515
520
525
530
535
540
260
255
250
245
Mers-les-Bains
le Tréport
Bresle
Eu
Mesnil-Val
Etalondes-la-Pipe
St Pierre-en-Val
Incheville
le Fresne
Monchy-sur-Eu
Criel-s-Mer
Mesnil-en-Caux
Tocqueville-s-Eu
Yeres
Assigny
Baromesnil
Millebosc
le Mesnil-Réaume
Guilmécourt
St Martin-en-Campagne
Guerville
Melleville
Sept-Meules
Auquemesnil
Braquemont
Tourville-la-Chapelle
DIEPPE
Graincourt
Glicourt
Intraville
Grèges
Ancourt
Arques
Eaulne
Bailly-en-Riviere
St Ouen s/s Bailly
Envermeu
Fresnoy

Ce territoire total de 30 964 ha contient des routes et des agglomérations. Pour avoir le territoire agricole correspondant, nous remarquerons que la surface totale des exploitations dans le Petit-Caux de 48 308 ha se monte à 35 022 ha (Boscq, 1958) d'où l'on déduit que la surface exploitée dans le Petit-Caux plus restreint que nous avons étudié, est de l'ordre de 36 000 × 31 000 /48 000 = 23 250 ha.

En utilisant la même source, on arrive à un nombre d'exploitations de l'ordre de 1843 × 31/48 = 1 191.

Par contre, en supposant qu'il n'y a pas une grande différence de structure entre notre Petit-Caux et le Petit-Caux de 48 308 ha, nous pourrons utiliser directement les répartitions ci-après calculées par Boscq d'après le recensement général agricole de 1955-56 :

Surface moyenne des exploitations..... 19 ha 58
Surface moyenne compte tenu des exploitations de moins de 5 ha.... 24 ha 16

Comme dans le Pays de Caux, il est possible de distinguer quatre types principaux d'exploitations :

A : 5 à 15 ha en zone côtière et 5 à 20 ha en zone intérieure. Purement familiales elles représentent près de 30 p. 100 des exploitations et 18 p. 100 des surfaces cultivées.

B : 15 à 45 ha en zone côtière et 20 à 45 ha dans l'intérieur. Exploitations familiales avec un salaire ou un ménage salarié. Elles représentent près de 25 p. 100 du total et 39 p. 100 des surfaces cultivées.

C : 45 à 65 ha. Le travail salarié devient prépondérant. Elles représentent un peu moins de 7 p. 100 avec un peu plus de 19 p. 100 des surfaces.

D : Plus de 65 ha. L'exploitant est essentiellement un directeur. Elles représentent un peu plus de 4 p. 100 des exploitations et plus de 19 p. 100 de la surface tivée.

La tendance est évidemment au regroupement des terres. Toutefois ce recensement datant de moins de 8 ans, on peut encore le considérer comme valable en 1962.

ASPECT GÉNÉRAL

Il s'agit d'un plateau crayeux surmonté d'argile à silex puis d'un limon éolien assez épais, parfois pur, mais souvent mélangé de résidus de décalcification plus ou moins argileux et caillouteux et parfois de sables et argiles tertiaires. Il est coupé par la seule vallée de l'Yère, entre Sept-Meules et Criel mais il existe, bien entendu, de nombreux petits vallons secs.

La bordure du plateau le long de la mer est constitué par une haute falaise qui atteint 100 mètres dans ses parties les plus élevées. Cette bordure monte progressivement mais avec des festons depuis l'embouchure de l'Arc (de la Béthune) pendant environ 8 km. Après le 13e km, elle descend en festons jusqu'à l'embouchure de l'Yère (20 km) puis remonte à 100 m et reste à cette altitude entre le 27e et le 28e km. Il y a enfin une chute brusque au Tréport jusqu'à l'embouchure de la Bresle. L'arrière-plateau est, dans l'ensemble, incliné vers la mer, mais avec des expositions variables résultant d'un ensemble de synclinaux et d'anticlinaux affectant le socle crayeux, dont nous dirons quelques mots ci-après.

Le long des quatre lignes de profils étudiés, perpendiculaires à la mer, donc orientés NW-SE, le pente moyenne des points hauts a varié entre 0,49 et 0,68 p. 100, ce qui peut amener les points élevés du plateau, sur une ligne d'environ 140 m d'altitude à 9 km de la mer.

Il faut bien se rendre compte qu'à l'œil, le paysage est généralement celui d'un plateau horizontal et que la culture y est presque partout facile. En particulier, il sera très valable de comparer les textures des sols avec celles des sols du plateau cauchois proprement dit.

LA GENÈSE DES SOLS DU PETIT-CAUX
QUELQUES FLUCTUATIONS GÉOLOGIQUES

Les sols de Haute-Normandie sont en majeure partie situés, on le sait, sur des plateaux crayeux dont les points culminants sont de l'ordre de 240 m., mais dont une large surface se situe à environ 150 m. d'altitude.

Ces plateaux sont recouverts, on le sait également, d'argile ou de bief à silex surmontés d'un limon fin plus ou moins épais, d'origine purement éolienne ou assez souvent mélangé de restes de la couverture tertiaire, notamment des grès.

En ce qui concerne le Petit-Caux, tel que nous l'avons défini, la craie superficielle est à rattacher au Sénonien jusqu'au Campagnien inclus, ou au Turonien. Il est difficile de distinguer la limite entre le Turonien et le Sénonien.

Au fond des grandes vallées comme celle de l'Yère ou celle de l'Eaulne, cette dernière étant une petite boutonnière à rapprocher de la boutonnière du Pays de Bray, on peut voir affleurer le Cénomanien, dont le passage au Turonien est également difficile à préciser.

Ce n'est pas ici le lieu de rappeler les différentes assises crayeuses que l'on peut voir dans les carrières ou rencontrer dans les forages. Disons simplement que les craies blanches superficielles sont généralement très pures (silex mis à part) et largement utilisées dans la neutralisation des sols de limon ou d'argile à silex (marnages).

Le massif crayeux s'est formé, bien entendu, dans la mer, il y a environ 100 millions d'années pour la base du plateau.

Les derniers étages déposés, Emschérien, Aturien... et peut-être un calcaire pisolithique dont les derniers restes correspondraient aux placages du Montien, ont été les premiers à subir l'érosion après l'émersion, c'est pourquoi il est difficile d'apprécier leur ancienne puissance. Tout ce que l'on peut dire est que le cycle principal d'érosion a pris fin avec le retour de la mer du Thanétien, il y a environ 60 millions d'années. Toutefois, la mer Thanétienne, venue du nord, parait avoir épargné, le nord-ouest du Pays de Bray et en particulier notre Petit-Caux.

C'est donc sur la surface d'érosion prétertiaire de nature karstique avec lapiès, dolines et vallées sèches que sont venus se déposer les sables sparnaciens. En particulier, les « bonhommes de craie » sont fréquents dans toutes les carrières de sables. Ils démontrent l'état du socle crayeux au moment de la fossilisation par les premiers dépôts éocènes.

Il faut noter que ces dépôts se sont effectués sous un climat chaud, tropical

ou subtropical. La plaine picarde, et en particulier le Petit-Caux était une région instable (à l'encontre des secteurs belges ou londonniens qui n'émergeaient que rarement), Elle comprenait par conséquent une multitude de vallées, d'estuaires, de deltas, de lagunes, de lacs, etc. qui offraient des conditions de sédimentation très diverses, d'où une multiplicité de couches dans les carrières. Ces couches subirent en outre des modifications ultérieures, notamment des silicifications (grès).

Au régime continental du Sparnacien a succédé une transgression yprésienne qui a laissé de nombreuses traces, et en particulier des sables et des petits galets noirs très roulés connus sous le nom de galets de Sinceny. Ces galets ne pouvant provenir que des silex de la craie, sont donc les témoins d'une exhumation partielle et d'une retouche de la surface prétertiaire.

Nous n'insiterons pas sur les autres transgressions et régressions tertiaires, que l'on peut suivre plus ou moins facilement par des bribes de dépôts. La dernière officiellement considérée pour le Bassin Parisien est la transgression stampienne, qui a déposé les sables d'Étampes et de Fontainebleau, entre 37 et 32 millions d'années.

Les sables marins ou lagunaires ou fluviatiles sont en grande partie disparus mais de nombreux grès se sont formés dans les dépôts sableux successifs, grès que l'on retrouve un peu partout dans la plaine picarde.

Argile a silex

Ce terme très général et assez vague mérite quelques explications particulières, d'abord parce que l'argile à silex est un sous-sol profond de tous les limons, d'où sa très grande importance dans l'économie de l'eau sur les plateaux, ensuite parce qu'elle affleure au sommet des flancs des vallées et des vallons, ou parce qu'elle constitue quelques surfaces agricoles non négligeables, même dans le Petit-Caux.

Nous suivrons principalement ici les descriptions et les conclusions de Philippe Pinchemel, dans sa thèse sur « les Plaines de craie » (1954). Pinchemel distingue d'abord un *conglomérat à silex* à petits silex anguleux rougeâtres émoussés, empâtés dans une argile ligniteuse ou un sable thanétien. Ces dépôts ne sont guère représentés dans le Petit-Caux.

Il note ensuite une *argile noire à silex*, peu épaisse : quelques centimètres à quelques dizaines de centimètres, constamment située à la surface de la craie et sous les dépôts sableux tertiaires, comprenant des concrétions et des fossiles divers (inocérames, crinoïdes...).

L'argile rouge à silex, au contraire, est une formation épaisse : plusieurs mètres, très étendue, souvent en surface, tout au moins en dehors du Petit-Caux (au sud).

Des épaisseurs de quelques dizaines de mètres peuvent se rencontrer dans des poches karstiques ainsi qu'il en a été mis en évidence au cours de creusement de puits pour eau ou pour marnières.

Comme pour l'argile noire, le contact avec la craie est très franc mais on n'observe pas de zone de transition en voie de décalcification.

Le contact entre l'argile noire et l'argile rouge n'est pas souvent visible, mais Pinchemel l'a observé dans une carrière près de Saint-Saëns et l'a relevé dans certaines coupes publiées. L'argile rouge surmonte alors l'argile noire par un contact très franc. Il peut aussi y avoir une couche de sable entre les deux argiles.

La composition de l'argile rouge est assez différente de celle de l'argile noire. Les silex et éclats de silex sont plus fréquents dans l'argile rouge, ainsi que des minéraux lourds ; ceux caractéristiques étant le rutile et le scyanite rappelant les sables sus-jacents. On trouve aussi de petites sphères (1 mm) d'oxyde de fer et des pastilles de bioxyde de manganèse.

PINCHEMEL conclut qu'il a y trop de différences de puissance et de composition pour que l'on puisse assimiler l'argile noire à de l'argile rouge modifiée au contact de la craie.

Reste maintenant l'expression : *bief à silex*. C'est en principe, un dépôt dérivant d'une argile à silex, après transport et modification par des éléments étrangers (sables, limons...)

Tous les aspects sont possibles. Par exemple, un amoncellement de silex enrobé de très peu d'argile, soit au contraire une couche plus ou moins épaisse d'argile fine déposée dans une petite cuvette après lessivage d'une argile à silex d'altitude supérieure, soit des mélanges en proportions variables d'argile et de sables ou de limons, avec ou sans silex, galets ou grès.

Les silex sont généralement entiers, rarement un peu usés.

Dans d'autres biefs, on peut au contraire trouver surtout des silex fragmentés en petits morceaux ou montrant des signes d'un transport un peu important.

Notons encore l'existence de lentilles ou d'intercalations de sables rouges argileux, avec silex usés et brisés, riches en gros grains de quartz roulés, dénotant des mélanges avec des sables tertiaires.

Les biefs à silex sont apparemment beaucoup plus fréquents que les couches en place d'argile à silex et témoignent de l'importance des phénomènes d'écoulement en nappe et des remaniements des formations supérieures à la craie, car bien entendu les biefs à silex dérivent manifestement des argiles à silex. A la limite, il peut être difficile de distinguer un bief d'une argile en place.

Nous n'insisterons pas sur les nombreuses discussions auxquelles ont donné lieu les formations appelées argile ou bief à silex. Nous dirons seulement que la thèse la plus simple quant à l'origine de l'argile à silex vraie est la décalcification de la craie. Les silex noirs branchus restent alors *in situ*, sans traces d'usure.

THOULET a étudié la craie de la falaise du Caux au N. E. d'Étretat. Par une attaque lente à l'acide chlorhydrique, il a recueilli un mélange identique à l'argile rouge typique surmontant cette craie (épaisseur 1 m). Admettant que les gros silex représentent 1/15e de la craie, et la moitié dans l'argile surimposée, il trouve que le mètre d'argile dérive de 50 m de craie.

D'autres auteurs proposent des valeurs différentes mais l'ordre de grandeur reste le même. Ceci permet de comprendre que quelques mètres d'argile à silex peuvent dériver directement de la disparition de quelques centaines de mètres de craie. Par contre, les grandes épaisseurs, 10 mètres et plus, résultent vraisemblablement de phénomènes de transport.

Mais PINCHEMEL, après une discussion serrée montre que la dissolution de la craie n'explique pas tout. Les premières argiles de décalcification sur la surface prétertiaire ont été souvent dispersées par le retour de la mer et ont contribué à la formation de l'argile plastique qui s'est déposé dans les lagunes sparnaciennes.

Les argiles correspondant aux biefs supérieurs résultent donc plutôt de l'intervention de l'argile plastique avec introduction de silex emballés dans de la véritable

argile de décalcification. Cette formation peut remonter à l'Éocène, sous un climat propice aux écoulements en nappes et aux phénomènes de rubéfaction.

La signification de l'argile à silex est très grande, tant au point de vue de la génétique des sols de la région que nous étudions, que du point de vue agronomique pratique. Mais il faudra encore de nombreuses observations très minutieuses et beaucoup de discussions pour qu'une théorie complète soit acceptée par tous les géologues et pédologues.

Limon des plateaux

Après l'émersion définitive du Bassin Parisien il y a environ 32 millions d'années, à la fin du Stampien, les points de repère manquent pour suivre le détail des transformations subies par le sol en surélévation.

On peut dire que le réseau hydrographique actuel s'ébaucha et que l'érosion commença son travail. Jusqu'au Quaternaire, c'est-à-dire pendant plus de 30 millions d'années, on peut facilement imaginer que de nombreux remaniements superficiels eurent lieu, qui expliquent notamment une certaine proportion des biefs à silex.

Les sables furent remaniés et évacués par les eaux, laissant sur place les grès formés à la partie supérieure ou médiane des bancs sableux. Des graviers et galets fluviatiles furent formés et déposés, etc.

La situation devient un peu plus claire après les premières glaciations quaternaires, avec dans notre région, et en particulier au Petit-Caux, le dépôt des premier limons éoliens sur les plateaux. Ces plateaux devaient avoir à peu près atteint la cote actuelle et étaient assez continuellement recouverts d'argile à silex ou de biefs à silex.

On sait qu'il y eut au moins 4 grandes glaciations, chacune présentant de nombreux avancements ou retraits des glaces, le tout formant un ensemble ayant duré de 600 000 ans à un million d'années.

Au plus fort de ces glaciations, l'indlandsis partait de l'Irlande, couvrait le nord de l'Angleterre, bloquait le nord de la mer du Nord et s'étendait ensuite sur le massif scandinave, le nord de l'Allemagne, etc. Il en résultait que la Manche et une grande partie de la mer du Nord étaient exondées. Les boues sous-glaciaires pouvaient y constituer de vastes surfaces qui, desséchées en été et soumises à des vents intenses, envoyaient des nuages de poussières sur la Hollande, la Belgique, le nord et le nord-ouest de la France, etc. Il faut aussi penser aux sédiments déposés par les grands fleuves, tel que la Seine, qui contribuèrent également aux nuages de limons éoliens. Ainsi, le Roumois, le Pays de Caux et la plaine picarde, etc, ont supporté des dépôts éoliens successifs, d'un sable quartzeux et calcaire, accompagné de limon et d'argile, dont le diamètre des grains triés par le vent, dépassait rarement 50 μ. Étant donné cette petite dimension, les quartz sont en majorité sous forme d'éclats tranchants transparents.

Les dépôts relatifs à chaque glaciation ont été plus ou moins bien repérés par les géologues. Ils sont très difficiles à dater. Par ailleurs, il est évident que les dépôts ont souvent été remaniés par les vents et par les eaux. Dans l'étude agronomique du Petit-Caux, nous ne serons pratiquement intéressé que par le dépôt le plus superficiel installé au cours du Würm et peu après. Dans les profils, poussés jusqu'à 1,25 m en sol de limon, nous avons souvent constaté la grande uniformité de ce dépôt.

Les analyses des profils le montreront.

Répartition des profils

Les quatre traversées, perpendiculaires à la mer, sont reportées sur la carte.

La première passe à l'est de Bracquemont, puis entre Grèges et Graincourt et traverse Ancourt.

La seconde passe à l'est de Saint-Martin-en-Campagne, puis entre Glicourt, Tourville-la-Chapelle et traverse Saint-Ouen-sous-Bailly.

La troisième passe à l'ouest de Tocqueville-sur Eu, puis à l'est d'Assigny, de Guilmécourt, et d'Auquemesnil.

La quatrième, la plus à l'est, passe entre le Tréport et Mesnil-Val, à l'est d'Étalonde, à l'est de Baromesnil et à l'est de Melleville.

Bien entendu, les points de prélèvement s'écartent tantôt un peu à l'ouest, tantôt un peu à l'est de ces lignes idéales. Ils sont chacun précisés par leurs coordonnées Lambert.

On se reportera à la carte pour apprécier les pentes de ces quatre profils (1). Précisons, qu'ils passent respectivement par les points de coordonnées ci-dessous :

Traversée I.....	512/253	— 515/249	— 518/245
Traversée II.....	519/254	— 522/250	— 525/246
Traversée III.....	524/256	— 527/252	— 530/248
Traversée IV.....	531/261	— 534/257	— 537/253

Description des profils

Le tableau 1 donne la situation ainsi qu'une description sommaire de chaque profil.

L'ensemble des analyses effectuées permet de tirer un certain nombre de constatations qui sont exposées ci-après.

Finesse des limons du Petit-Caux

La détermination des spectres sableux siliceux pour toutes les couches des profils a permis de se rendre compte d'une façon très précise de la finesse des limons de cette petite région naturelle.

Pour cela, nous avons dressé un graphique (graph. 1) comprenant en ordonnées les lettres caractérisant les pourcentages de la classe 20-50 μ dans l'ensemble des sables et en abscisse, les lettres caractérisant les pourcentages des sables 50-100 μ.

Étant donné que les limons des plateaux du NW de la France sont marqués par une forte prédominance de ces classes granulométriques dans l'ensemble de leurs sables 0, 02 à 2 mm, le nuage de points se place tout naturellement — avec des échelles appropriées — suivant une droite inclinée à 45° sur les axes telle que la somme des pourcentages des couples de classes 20/50 μ — 50/100 μ atteigne 100 p. 100. Exemple : $i + p$ = 30 à 35 p. 100 + 60 à 65 p. 100 ; $m + n$ = 45 à 50 p. 100 + 50 à 55 p. 100 ; $r + h$ = 70 à 75 p 100 + 20 à 25 p. 100.

(1) Elles sont en moyenne de 0,5 à 0,7 p. 100, soit 50 à 70 mètres d'élévation depuis le bord de la falaise jusqu'aux champs situés à 10 km à l'intérieur.

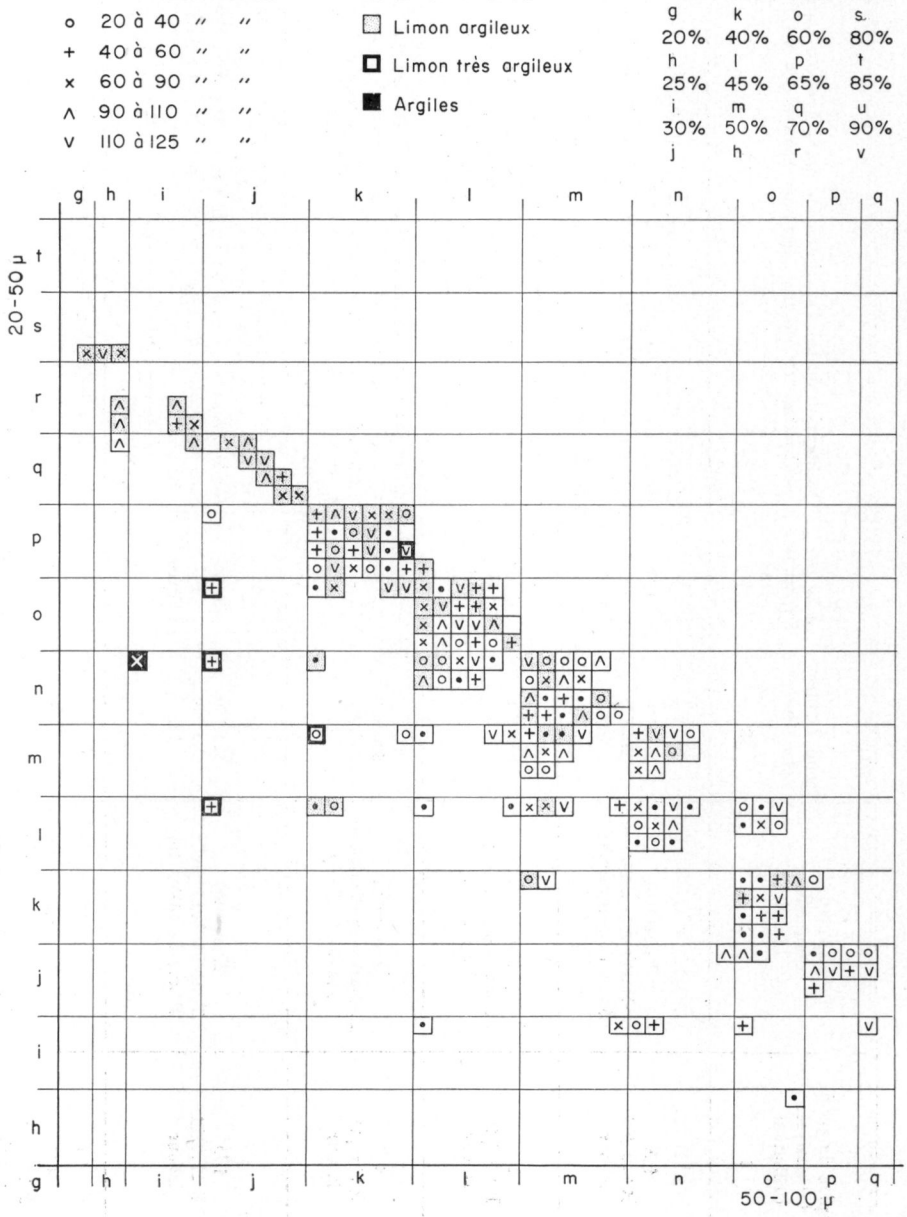


FIG. 1. — *Spectres sableux-siliceux*

TABLEAU I

Description des profils du Petit-Caux

Repère du profil N° analyse Utilisation 1	Canton Commune Lieudit 2	Coord. Lambert et altitude 3	Distance à la mer Exposition pente 4	Qualification du sol. Description du profil. Richesse nutritive. Spectre sableux siliceux caractéristique. Coloration Munsell (sec à l'air). 5
1 A R 2205/06 labour	Envermeu St-Martin-en-Campagne Mont de Vassonville	519,110 253,120 102	150 — nulle	Limon argileux, assez caillouteux, sur argile à silex ; pH surface = 5,6 ; pH 40 cm = 5,8. Cailloux 3 à 8 p. 100 jusqu'à 40 cm ; 15 p. 100 d'argile jusqu'à 40 cm ; 2 p. 100 mat. org. en surface ; P_2O_5 = très pauvre, K_2O = faible, MgO = bon. Spectre sableux : *lld/daa — kme/eaa* ; Col. Munsell = brun YR 5/4.
1 B R 2207/10 labour	Envermeu St-Martin-en-Campagne Le Cailloux	519,640 252,220 110	1 300 SW faible	Limon argileux assez caillouteux, sur argile à silex, 3 à 7 p. 100 cailloux ; pH surface = 6,7 pH profondeur = 6,3 à 28 cm ; 20 p. 100 argile en surface ; 26 à 52 cm ; 2,8 p. 100 mat. org. en surface ; 0,9 p. 100 à 28 cm ; P_2O_5 = pauvre ; K_2O = pauvre ; MgO = bon. Spectre sableux : *mld/daa — oid/ddb* ; Col. Munsell = 7,5 YR 5/5 ; 7,5 YR 5/8.
1 C R 2211/16 labour	Envermeu St-Martin-en-Campagne Plaine de Penly	520,400 252,350 117	1 600 — nulle	Limon limoneux passant au limon argileux vers 0,90 m, légèrement calcaire 0,1 à 0,3 p. 100 ; pH = 7.4 ; 11 p. 100 argile en surface et 17 p. 100 à 1 m ; 2,2 p. 100 mat. org. en surface et 0,8 à 1 m ; P_2O_5 = faible ; K_2O = moyen. Spectre sableux : *kob/aax — nmb/aax* ; Col. Munsell = brun 7,5 YR ; 5/4 ; brun fort 7,5 YR 5/7.
1 D R 2217/22 labour	Envermeu Tourville-la-Chapelle Plaine de St-Martin	521,180 250,780 122	3 300 SE légère	Limon limoneux passant au limon argileux vers 0,90 m. pH surface = 5,6 ; pH profond. = 6,3. Argile surface = 10 p. 100 ; Argile 1 m = 20 p. 100. Mat. org. surf. = 2 p. 100. Mat. org. prof. = 0,7 ; P_2O_5 = bon ; K_2O = bon ; MgO = moyen ; sous-sol très pauvre. Spectre sableux : *lnb/aaa — mna/aax* ; Col. Munsell : brun 7,5 YR 4/4 ; brun fort 75 YR 5/7.
1 E R 2223/26 prairie	Envermeu Tourville-la-Chapelle Plaine de St-Martin	521,240 250,540 118	3 700 SW ± 10 %	Limon argileux peu caillouteux (1 à 5 p. 100). pH surface 5,0 ; pH profondeur = 5,6. Argile surface = 15 p. 100. Argile à 50 cm = 17,5 p. 100. Mat. org. surf. = 4 p. 100 Mat. org. 50 cm = 1 p. 100 ; P_2O_5 = faible ; K_2O = très élevé ; MgO = forte. Spectre sableux : *nmb/aaa—nla/aab*. Col. Munsell : brun 7,5 YR 4/4 à 5/4 ; brun fort 7,5 YR 5/6,2.

1 F R 2227/28 Pâture maigre	Envermeu St-Martin-en-Campagne Coteau Val-de-l'Église	518,620 252,900 65 à 85	100 SSW ± 32 %	Rendzine ; Calcaire total surface = 30 p. 100 ; à 25 cm = 50 p. 100. pH surface = 7,6 ; Argile = 20 p. 100 ; Mat. org. = 9 à 11 p. 100. Col Munsell : brun gris foncé 10 YR 4/2 ; brun grisâtre 10 YR 5/2.
1 G R 2229/32 labour	Envermeu St-Martin-en-Campagne Mont de Vassonville	518,860 253,050 97	100 NW 5 %	Limon argileux caillouteux 14 p. 100 en surface ; 4 p. 100 en sous-sol. pH = 6,5 à 6,7 ; Argile terre fine surf. = 21 p. 100 ; à 40 cm = 39 p. 100. Mat. org. surface = 3,6 p. 100 ; à 40 cm = 1,1 p. 100. P_2O_5 = faible ; K_2O = moyen ; MgO = très bon. Spectre sableux *lke/eaa — ljf/fbb* ; Col. Munsell brun foncé 7,5 YR 4/4 ; brun rouge jaunâtre 5 YR 4,5/8.
1 H R 2233/39 labour	Envermeu Envermeu La sente d'Intraville	522,740 247,240 133	6 600 NW 1,6 %	Limon limoneux en surface devenant argileux vers 0,50 m, sans cailloux. pH surface = 5,4 ; sous-sol = 5,8 ; profondeur = 6,6 ; Argile surface 11 p. 100 ; Argile 1,25 = 20 p. 100 ; Mat. org. surface 2 p. 100 et 0,4 p. 100 à 1,25 m. P_2O_5 faible ; K_2O = très faible ; MgO = faible. Spectre sableux : *nla/aaa — pka/axx* ; Col. Munsell brun jaunâtre 10 YR 5/4 ; brun fort 7,5 YR 5,7.
2 A/B R 2248/56 labour	Envermeu Intraville Ferme de Mahomet	522,875 247,950 132	6 700 — nulle	Argile à silex assez caillouteuse ; 5 à 11 p. 100 ; mouillières. CO_3Ca = 0,4 p. 100 ; pH = 7,4 ; Argile terre fine 20 p. 100 en surface ; 64 p. 100 à 70 cm ; Mat. org. surface = 2,5 et 0,5 en profondeur. P_2O_5 = faible ; K_2O = faible à moyen ; MgO = faible. Spectre sableux : *pic/cbb — mke/daa — nif/dbb* ; Col. Munsell : 10 YR 5/4 ; 7,5 YR 5/6 ; 2,5.
2 C R 2257/63 labour	Envermeu Tourville-la-Chapelle Les Champarts	522,050 248,775 131	5 500 NW 1,1 %	Limon limoneux devenant argileux vers 0,75 m, sans cailloux. pH surface = 5,4 ; profondeur = 6,0 à 6,5 vers 1 m 20 ; Argile surface = 12 p. 100 ; P_2O_5 = faible ; K_2O = assez faible ; MgO = très faible. Spectre sableux : *ola/aax — ola/aax.*
2 D R 2264/69 labour	Envermeu Envermeu Plaine Sente Intraville	523,800 246,450 148	8 500 — nulle	Limon limoneux en surface devenant argileux vers 30 cm. Graviers à 1 m. pH surface = 7,1 ; profondeur = 7,5 avec 0,4 p. 100 CO_3Ca ; Argile surface 13 p. 100 ; Argile profondeur = 15 à 18 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,7 p. 100 et 1 p. 100 à 0,90 m ; P_2O_5 = pauvre ; K_2O = pauvre ; MgO = faible en surface et pauvre en profondeur. Spectre sableux = *pka/aax* à *ola/axx.*
2 E R 2270/76 Pré-verger	Envermeu Envermeu Plaine de Bray	524,580 246,100 153	9 100 — nulle	Limon argileux sans cailloux ; pH = 6,1. Argile 15 à 17 p. 100 dans le profil, tombant brusquement à 6 p. 100 vers 1,25 m. Mat. org. = 5,5 en surface ; 3 p. 100 à 1 m mais 25 p. 100 à 1,25 m ; P_2O_5 faible — K_2O = moyen en surface ; faible à 20 cm — MgO = faible en faible en surface mais bon à 20 cm. Spectre sableux : *pka/aax — qja/axa — iqd/baa*

TABLEAU I *(suite)*

Repère du profil N° analyse Utilisation 1	Canton Commune Lieudit 2	Coord. Lambert et altitude 2	Distance à la mer Exposition pente 4	Qualification du sol. Description du profil. Richesse nutritive. Spectre sableux silicieux caractéristique. Coloration Munsell (sec à l'air) 5
2 F R 2277/82 labour	Dieppe Grèges Le Traversal	515,300 248,025 93	2 900 — nulle	Limon limoneux sans cailloux pH = 5,1 — Argile surface = 11 p. 100 — Argile 70 cm = 15 p. 100 Mat. org. surface = 2 p. 100 P_2O_5 = faible — K_2O = assez faible — MgO = bon Spectre sableux : *nmb/aaa — olb/aax*
2 G R 2283/89 labour	Dieppe Grèges Le bout du Bas	515,600 247,200 99	3 600 NW 1,8 %	Limon limoneux — quelques cailloux superficiels — sans cailloux après 0,30 m Argile surface = 9 p. 100 ; Argile sous-sol = 15 p. 100 ; Argile à 1,20 m = 11 p. 100. pH surface = 6,6 ; Mat. org. 2,7 p. 100 en surface et 1 p. 100 en profondeur. P_2O_5 = faible ; K_2O = bon ; MgO = riche. Spectre sableux : *okb/aaa — ola/axa — nma/aaa.*
2 H R 2290/96 labour	Dieppe Grèges Fosse aux Hérondes	515,000 248,780 91	2 000 NN 2 %	Limon limoneux ; sans cailloux ; pH = 6,3. Argile surface = 13 p. 100 ; Argile 1 m = 11 p. 100. Mat. org. surface = 2,5 p. 100 ; profondeur = 1,1 p. 100. P_2O_5 = faible ; K_2O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux — *ola/aax* ; *mna/axx.*
2 I R 2297/2302 labour	Dieppe Bracquemont La Vierge	514,300 250,270 81	380 — nulle	Limon limoneux ; quelques cailloux apportés en surface par les marnages ; pH = 6,0. Argile = 11 p. 100 en surface ; 9 p. 100 en sous-sol ; bande argileuse 16 p. 100 vers 30 cm. Mat. org. surface = 2,3 p. 100 ; profondeur = 1,2 p. 100 ; P_2O_5 = faible. K_2O = faible ; MgO = riche en surface, faible en sous-sol. Spectre sableux : *kod/baa — lnd/bax.*
2 J R 2303 labour	Dieppe Bracquemont La Vierge	514,360 250,040 81	600 — nulle	Limon. Argile surface = 11 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,2 p. 100.
3 A R 2304/09 labour	Eu Tocqueville-sur-Eu Plaine Mesnil à Caux	524,170 256,750 85,5	800 — nulle	Limon limoneux, sans cailloux. pH = 6,6. Argile surface = 9 p. 100 ; sous-sol 30/70 cm = 14 p. 100 ; profondeur = 12 p. 100. Mat. org. surface = 2 p. 100 ; profondeur = 0,6 à 0,8 p. 100. P_2O_5 = faible ; K_2O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux : *lnc/aax — koc/axx.*

3 B R 2310/15 labour	Eu Tocqueville-sur-Eu Plaine Mesnil à Caux	524,000 256,060 86	1 200 — nulle	Limon limoneux ; pH = 6,6. Argile surface = 11 p. 100 ; argile entre 30 et 70 cm = 14 p. 100 ; profondeur = 8 p. 100 ; Mat. org. = 2,1 p. 100 en surface et 0,8 en profondeur. P_2O_5 = riche ; K_2O = riche ; MgO = bon. Spectre sableux : *koc/bax — jpc/baa — mmc/axx.*
3 C R 2316/18 labour	Eu Tocqueville-sur-Eu Les Falaises	523,440 256,930 82	200 — nulle	Limon limoneux un peu caillouteux ; pH = 6,6. Argile surface = 9 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,7 p. 100 et 1 p. 100 à 60 cm. P_2O_5 = riche ; K_2O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux : *ilf/faa — iof/daa.*
3 D R 2319/24 prairie 4 ans	Eu Tocqueville-sur-Eu Plaine de Biville	524,190 255,820 89	1 550 NE %	Limon limoneux un peu caillouteux. pH surface = 6,5 ; sous-sol = 6,9 ; argile de 0 à 80 cm = 9 p. 100. Argile à 1,20 m = 15 p. 100 ; Mat. org. = 2,5 p. 100 en surface et 1 p. 100 à 1,20 m. P_2O_5 = moyen ; surface et premier sous-sol ; K_2O et MgO = faibles. Spectre sableux : *loc/baa-jqc/baa — lnb/axx.*
3 E R 2325/29 labour	Envermeu Assigny Derrière le Clos	524,260 255,100 90	2 100 — nulle	Limon limoneux, un peu caillouteux, traces de calcaire. pH = 7,3 ; Argile surface = 9 p. 100 ; Argile 85 cm = 16 p. 100. Mat. org. surface = 3,1 p. 100 ; Mat. org. à 30 cm = 2 p. 100 ; Mat. org. à 80 cm = 1 p. 100 ; P_2O_5 = bon ; K_2O = moyen ; MgO = faible. Spectre sableux : *kob/aaa — nmb/aaa.*
3 F R 2330/35 labour	Envermeu Guilmécourt Plaine du Moulin	525,180 253,030 102	4 200 NE 0,5 %	Limon limoneux, sans cailloux ; pH = 6,5. Argile surface = 9 p. 100 ; Argile 1,20 m = 15 p. 100. Mat. org. surface = 2,3 p. 100 ; Mat. org. 50 cm = 1,8 p. 100 ; Mat. org. 1,20 m = 1,3 p. 100 ; P_2O_5 = bon ; K_2O = faible ; MgO = bon. Spectre sableux : *nmb/aaa — nlb/axx.*
3 G R 2336/41 labour	Envermeu Guilmécourt Plaine de la Vacherie	526,500 253,120 101	5 000 — nulle	Limon limoneux, puis argileux ; quelques cailloux superficiels des marnages ; trace de calcaire ; pH = 7,3. Argile surface = 9 p. 100 ; Argile profondeur = 18 p. 100 ; Mat. org. surface = 3 p. 100 ; Mat. org. 30 cm = 2 p. 100 ; P_2O_5 = bon ; K_2O et MgO = moyens. Spectre sableux : *lnb/aaa olb/axx.*
3 H R 2342/47 labour	Envermeu Guilmécourt Sole du Moulin	528,560 249,920 136	8 800 NE très légère	Limon limoneux puis argileux ; sans cailloux. pH surface = 6,7 ; profondeur = 6,9. Argile surface = 12 p. 100 ; Argile 70 cm = 19 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,7 à 1 p. 100 à 70 cm ; P_2O_5 = moyen ; K_2O = bon ; MgO = moyen. Spectre siliceux : *nma/aaa — pkb/axx.*
3 I R 2348/53 labour	Envermeu Auquemesnil Plaine du Bois de Guilmécourt	527,560 250,940 124	7 300 SN à WNE 0,5 %	Limon limoneux puis argileux ; pH = 7,3. Argile surface = 12 p. 100 ; Argile 1,20 m = 19 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,5 p. 100 et 1,2 p. 100 à 1,20 m. P_2O_5 = riche ; K_2O = pauvre ; MgO = très pauvre. Spectre sableux : *lna/axa — oka/axx — nma/xxa.*

TABLEAU I *(suite)*

Repère du profil N° analyse Utilisation 1	Canton Commune Lieudit 2	Coord. Lambert et altitude 3	Distance à la mer Exposition pente 4	Qualification du sol. Description du profil. Richesse nutritive. Spectre sableux siliceux caractéristique. Coloration Munsell (sec à l'air). 5
4 A R 2638/43 labour	Eu Étalondes Le Briquet	532,920 259,530 86	4 400 — nulle	Limon limoneux, sans cailloux ; terre utilisée autrefois en briqueterie ; pH = 7,1 ; Argile en surface = 8 p. 100 ; premier sous-sol = 10 p. 100 ; en profondeur = 13 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,1 p. 100 ; profondeur = 1,2 p. 100. P_2O_5-K_2O-MgO = moyennement riche. Spectre sableux : *kob/aaa* — à *nlc/aax* à 1,25 m.
4 B R 2644/49 labour	Eu Étalondes Plaine du Mont-Vitot	532,800 260,530 86	3 000 — nulle	Limon limoneux, profond, sans cailloux ; 0,8 p. 100 de calcaire en surface. pH = 7,5 ; Argile 7 à 8 p. 100 dans tout le profil ; Mat. org. = 2 p. 100 en surface et 1,5 à 1,7 p. 100 dans le profil. P_2O_5 = bon ; K_2O = moyen ; MgO = moyen. Spectre sableux très régulier : *mnb/aax*.
4 C R 2650/56 labour	Eu Étalondes Plaine de Moucheville	531,620 261,220 96	1 900 N 1,5 %	Limon limoneux puis argileux ; pH = 6,6 à 7,0 en profondeur. Argile surface = 8 p. 100 jusqu'à 60 cm puis 16 à 18 p. 100 entre 60 et 110 cm, puis 13 p. 100 à 1,25 m ; Mat. org. surface = 3,2 p. 100 ; 15 p. 100 à 50 cm et 0,6 p. 100 en profondeur ; P_2O_5 = bon ; K_2O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux : *jpd/aaa* à *lmc/aaa*.
4 D R 2657/62 labour	Eu Le Tréport Plaine de la Falaise	529,620 261,960 93	300 WSW 2 %	Limon limoneux léger, un peu caillouteux (0,7 p. 100 surface ; 5 p. 100 à 1,20 m) pH = 7,3 ; CO_3Ca = 0,1 à 0,2 p. 100 ; sable un peu grossier 3 à 4 p. 100. Argile surface = 5,5 p. 100 et 3 à 6 p. 100 dans le reste du profill; Mat. org. = 3,6 p. 100 en surface ; 1 p. 100 à 1,20 m ; P_2O_5 = moyen ; K_2O = faible MgO = moyen.
4 E R 2663/68 labour	Eu Le Tréport Plaine de la Falaise	529,970 261,460 95	900 WSW 1,75 %	Limon léger sans cailloux ; sable grossier 2 à 5 p. 100 dans le profil. pH = 6,9 en surface et 7,0 en profondeur ; Argile 0-60 cm = ± 8 p. 100. Argile 60 cm à 1,00 m = 12 à 13 p. 100l ; Argile à 1,20 m = 9 p. 100. Mat. org. à 1 m = 1 p. 100 ; P_2O_5 = bon ; K_2O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux variant autour de *mle/baa*.
4 F 2669/74 labour	Eu St-Pierre-en-Val Plaine de Ste-Marguerite	534,630 258,270 87	6 400 N 0,6 %	Limon limoneux, puis argileux, un peu caillouteux. pH surface = 7,0 ; pH profondeur = 7,4 avec traces de calcaire. Argile à 9 à 10 p. 100 jusqu'à 70 cm, puis 17 à 22 p. 100 jusqu'à 1,25 m (max. à 1 m) ; Mat. org. = 2,4 p. 100 en surface ; P_2O_5-K_2O-MgO = bonne teneur Spectre sableux : *nlb/aax* surface à *oka/aax* à 1,25 m.

4 G R 2675/80 labour	Eu St-Pierre-en-Val Le Fresne	536,900 257,330 91	8 000 NNE 2 %	Limon limoneux, sans cailloux jusqu'à 0,70 m ; plus argileux et un peu caillouteux en profondeur ; pH surface = 6,0 ; profil : 6,7 à 6,8. Argile surface = 10 à 12 p. 100 ; puis augmentation de 13 à 27 p. 100 entre 0,50 et 1,30 m ; Mat. org. surface = 2,5 p. 100 ; P_2O_5 = très pauvre ; K_2O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux : *pka/aaa* dans tout le profil.
4 H R 2681/86	Eu Monchy-sur-Eu Plaine du Château-d'eau	537,620 255,370 115	10 400 NNE 0,5 %	Limon argileux sans cailloux. pH surface = 5,7 puis 6,0 et 6,3 à 1 m ; Argile surface = 15 p. 100 ; profondeur = 20 à 22 p. 100 ; Mat. org. surface = 2,2 et 0,4 p. 100 en profondeur. P_2O_5 = pauvre ; K_2O = moyen ; MgO = moyen. Spectre sableux : *pkb/aaa* puis *ria/axx* entre 60 et 90 cm ; *qja/axx* en profondeur.
4 I R 2687/92 labour	Eu Millebosc La Plate-Mare	540,260 254,150 126	12 800 N 3 %	Limon argileux, sans cailloux ; pH surface = 6,8 ; profondeur = 6,1. Argile surface = 13 p. 100 ; sous-sol proche = 15 à 16 p. 100 ; de 60 cm à 1 m = 20 p. 100 mais 18 p. 100 à 1,25 m ; Mat. org. = 2,2 en surface et 0,5 en profondeur. P_2O_5 = très pauvre ; K_2O = très pauvre ; MgO = faible. Spectre sableux : *pka/aaa* en surface ; *shx/xxx* de 40 cm à 1,10 m ; *oka/axx* en profondeur.
4 J R 2693/98 labour	Eu Guerville Le Quesnot	540,360 252,020 160	14 400 N 1 %	Limon argileux, un peu caillouteux en profondeur ; pH = surface 5,4 ; profondeur = 6,0 ; Argile surface = 14 à 15 p. 100 puis 19 à 21 p. 100 de 0,40 à 1,25 m ; Mat. org. surface = 2,1 et 0,5 à 1,25 m. P_2O_5 = très pauvre ; K_2O = faible ; MgO = moyen. Spectre sableux : *pka/aaa* jusqu'à 0,70 m puis plus fin *sga/aaa* ou *rha/aaa* jusqu'à 1,25 m.
4 K R 2699/2704 labour	Eu Melleville La Remise	537,520 251,030 166	14 000 NW 2 %	Limon argileux, légèrement caillouteux en profondeur ; pH surface = 6,5 ; profondeur = 6,7 ; Argile surface 14 à 15 p. 100 ; sous-sol = 19 à 20 p. 100 jusqu'à 1,25 m ; Mat. org. surface = 2,6 ; profondeur = 0,8. P_2O_5 = faible ; K_5O = moyen ; MgO = bon. Spectre sableux : *ola/aaa* à *qja/aaa* en profondeur.

Aucun point ne peut donc se placer en dehors du triangle formé par les deux axes et son hypothénuse à 45°. Par contre, tous les limons un peu grossiers ont des classes plus ou moins garnies en dehors des deux classes précitées et les points figuratifs se placent à l'intérieur du triangle où ils sont facilement remarqués.

Pour dresser ce graphique, nous avons pris dans chaque profil, les six couches dont les profondeurs couvraient au mieux la série ci-après :

10/20 — 20/40 — 40/60 — 60/90 — 90/110 — 110/125 cm et nous avons affecté chaque couche d'un signe particulier, respectivement : point — cercle — croix grecque — croix de saint André — chevron pointé en haut — chevron pointé en bas.

Par ailleurs, nous avons matérialisé chaque couple de classes par un carré ou un rectangle de surface variable suivant les quantités de points à y inclure disposés de telle sorte que les diagonales des carrés successifs soient confondues avec la droite hypothénuse du triangle.

Le fond du graphique étant un quadrillage, chaque quadrilatère de classe ainsi délimité comportait un certain nombre de carreaux. Chaque carreau, suivant sa position, a alors reçu l'un des signes de profondeur. Enfin, le fond du carreau a été laissé clair ou a reçu un grisé variant avec le type de sol, basé sur la teneur en argile. On a retenu 4 types, savoir : limon limoneux s'il y a moins de 15 p. 100 d'argile, limon argileux entre 15 et 25 p. 100, limon très argileux entre 25 et 50 p. 100, argile enfin, au-dessus de 50 p. 100.

En définitive, nous avons placé 187 signes (tous les profils n'ont pu être forés jusqu'à 1,25 m et par ailleurs certaines analyses tombent dans une même classe de profondeur). Si l'on examine le graphique formé, on peut dégager quelques conclusions intéressantes :

1° les limons du Petit-Caux sont toujours très fins en ce sens qu'il n'y a pas ou très peu de sables grossiers 2-0,2 mm (encore ceux-ci sont-ils dus en majeure partie à de petits agglomérats quartz + limonite, comme dans tous nos linoms des plateaux), et peu de sables fins de 0,2 à 0,1 mm ;

2° il y a cependant des variations nettes de finesse jouant sur le rapport des classes 20/50 μ — 50/100 μ. On constate que les couches profondes, au-dessous de 30 cm sont plus fines que les couches superficielles. Ceci suggère que le dépôt éolien superficiel résulte soit de la contribution d'une plage d'ablation relativement proche, soit que le transport a été fait par un vent relativement fort

3° ces couches profondes sont les plus riches en argile. Ceci doit résulter à la fois de la finesse d'un dépôt éolien primitif et du processus pédologique de migration de l'argile après dissolution totale du calcaire en surface.

Corrélativement, les couches superficielles sont nettement faibles en argile. ;

4° une dizaine de points se situent à l'intérieur du triangle. Les échantillons correspondants sont donc un peu plus grossiers que l'ensemble des limons. Ce sont surtout des sous-sols de profondeur moyenne, argileux ou très argileux, un peu caillouteux, donc dérivant ou voisins de biefs à silex. Toutefois, malgré la présence de cailloux, et ceci est une remarque générale pour les biefs à silex ou les limons caillouteux, la proportion de sables grossiers dans la terre fine reste très modérée. On aura par exemple les spectres sableux : *inf/daa — kme/eaa — oid/ddb — ljf/fbb — nla/aab.* Autrement dit les différentes catégories de sables grossiers restent de l'ordre de quelques p. 100, avec un total des sables 0,2-2 mm généralement inférieur à 10 p. 100 du groupe des sables siliceux.

Il y a toujours un très net hiatus entre les cailloux qui sont des silex plus ou moins gros, peu ou pas émoussés, et la terre fine, riche en argile, limons et en sables fins et moyens.

Répartition géographique de la finesse des limons

Une question souvent soulevée à propos de la finesse des limons éoliens est la répartition géographique de cette finesse. En particulier, on assure souvent, dans les milieux agricoles du Pays de Caux et du Petit-Caux, que les terres du bord de la mer sont plus grossières et plus filtrantes que les limons de l'intérieur.

Nous avons examiné cette question à plusieurs reprises, en nous basant sur les nombreux profils granulométriques dont nous disposons (E. Jouis, 1961). Théoriquement, il est normal que les limons les plus proches de leur origine, et en particulier des fonds exondés de la mer du Nord et de la Manche, pendant les glaciations quaternaires, soient plus grossiers que les limons déposés à des dizaines ou des centaines de kilomètres à l'intérieur.

Il semble en effet qu'il en soit bien ainsi, mais la mise en évidence de ce phénomène reste délicate pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les limons éoliens dont on soit sûr qu'ils sont bien en place sont relativement rares. Un bon critère me paraît être une forte épaisseur, au moins plusieurs décimètres, d'un limon homogène et d'une surface suffisante (plusieurs hectares) sans cailloux ou graviers. Toutefois, il est de règle que la surface d'un limon cultivé soit un peu caillouteuse, du fait de l'apport de silex par les marnages.

En second lieu, un dépôt déjà situé à plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de kilomètres de l'aire d'ablation ne comporte plus que des éléments très fins variant peu avec la distance. Il faut donc pouvoir disposer d'une méthode d'analyse granulométrique fine et fidèle. Pour le Petit-Caux, nous voyons que la variation porte sur le rapport des pourcentages dans les classes 20-50 μ et 50-100 μ avec une étendue d'environ $\pm$ 15 p. 100 par rapport à la moyenne.

En troisième lieu, les zones d'ablation ont dû être multiples, quoique sans doute d'importance inégale suivant les époques et les régions. En particulier les bancs des fleuves ou rivières, telle que la vallée de Basse-Seine, peuvent avoir contribué localement à la formation des nuages de poussières. Il en résulte une complication dans les dépôts.

En quatrième lieu, des remaniements restreints après dépôts sont fort probables, soit par le vent, soit même par l'eau.

Toutes ces considérations font qu'une cartographie des limons en fonction de leur finesse demanderait un gros travail de prélèvements et d'analyses.

Dans le cadre de la présente étude des sols de Petit-Caux, nous avons pu apporter une petite contribution en dressant un graphique (graph. 2) à l'aide des résultats, pour les couches de profondeur 20-40 et 90-110 cm, d'une vingtaine de profils de limons du Petit-Caux paraissant d'origine, répartis dans des bandes de 2,5 km de large parallèles au rivage entre Dieppe et le Tréport. On constate indubitablement une légère augmentation de la finesse au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la mer, tant par les couches entre 20 et 40 cm que celles comprises entre 0,90 et 1,10 m.

Toutefois l'effet agronomique rapporté de plus grande légèreté des sols sur les plateaux dominant la mer tient surtout à deux autres causes : le drainage facile et le vent, plus importantes que la petite différence de finesse des sables.

Acidité des sols et sous-sols du Petit-Caux

Les sols de limon des plateaux sont, en principe, à l'origine, assez fortement calcaires. Les couches profondes encore calcaires constituent l'ergeron.

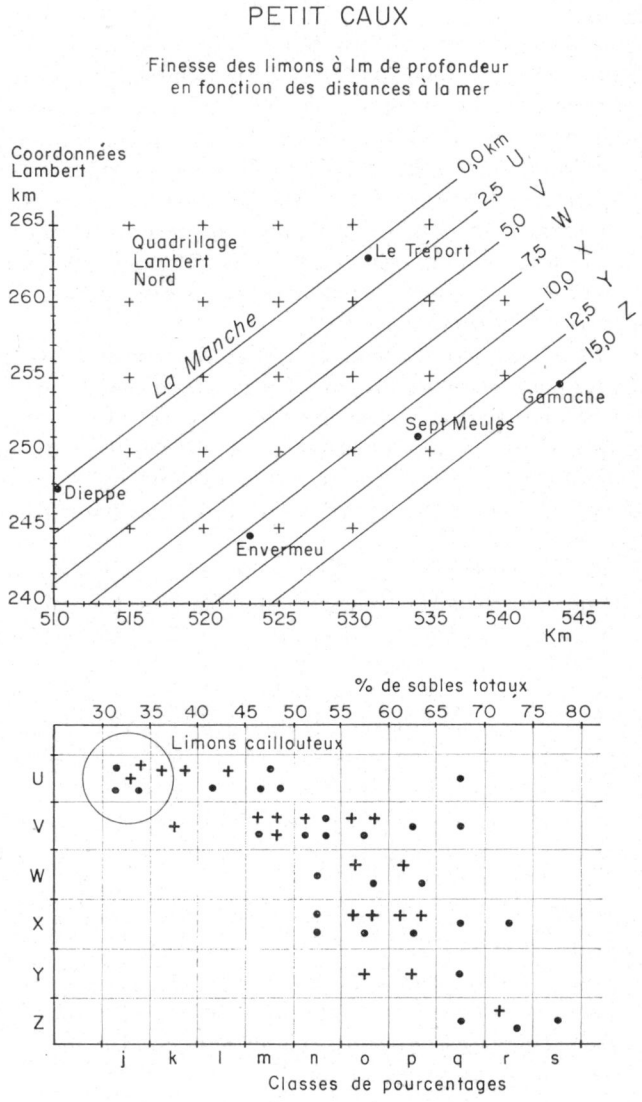


FIG. 2

En Haute-Normandie, on peut voir un ergeron dans la carrière de la briqueterie d'Iville, près du Neubourg (JOUIS et LECACHEUX, 1956). Il y en avait un dans la carrière aujourd'hui remblayée de Bonsecours, au-dessus de Rouen (BRIOUX et AGAFONOFF 1931).

D'une façon générale, ces ergerons quand ils existent sont trop profonds pour que les sondages agronomiques puissent les rencontrer. Les couches superficielles, après des millénaires de lessivages par la pluie, sont complètement décalcifiées et elles seraient impropres à la plupart des cultures, notamment à celle de la betterave, si les cultivateurs, depuis la préhistoire n'avaient constamment « fumé leurs sols avec des pierres blanches » ainsi que le remarque Jules CÉSAR dans ses *Commentaires sur la Gaule*.

On rencontre donc deux types principaux de profils d'acidité : le type des sols n'ayant pas reçu d'amendement calcaire (ou très peu) depuis des décennies et le type des sols régulièrement amendés.

Le premier type est illustré par les profils 1 D et 1 H dont les pH des sols arables sont à 5,4-5,6, les sous-sols immédiats aux environs de pH = 6,0 et les sous-sols profonds assez constants sur une grande épaisseur, entre 6,3 et 6,6.

Le second type, par exemple le profil 4 H, présente un sol assez fortement amendé, avec pH = 7,3, puis un sous-sol immédiat sensiblement neutre et des couches profondes variant entre 6,2 et 6,4.

Les biefs à silex ou limon caillouteux dérivés ont un profil d'acidité un peu différent en ce sens que le pH est normalement plus élevé dans tout le profil — environ 7,2 à 7,3 — Mais on distingue également le type acide (ou plutôt neutre) en surface : pH voisin de 7,0 et le type entretenu, voisin de 7,4-7,5. A noter que ces sols étant plus argileux — tout au moins pour la terre fine entre les cailloux — le pouvoir tampon plus fort limite les variations de pH.

On rencontre enfin quelques types intermédiaires présentant une baisse de 0,1 à 0,3 pH dans le sous-sol proche qui semble révéler une ancienne interruption temporaire, peut-être d'une centaine d'années dans l'apport des amendements.

Capacité d'échange et bases échangeables

La capacité d'échange des terres de limon du Petit-Caux (acétate NH_4 pH = 7) est très analogue à celle des terres du Pays de Caux et de l'Arrière-Caux (Caux-Est, Entre-Caux et Vexin..).

Les déterminations faites par le laboratoire des sols d'Arras pour plusieurs centaines d'échantillons de sol et sous-sol de la Seine-Maritime, de l'Eure et quelques profils du Calvados montrent que la presque totalité ont une CE comprise entre 7 et 13 méq. pour 100 grammes.

Il a été possible de calculer une formule empirique qui permet de retrouver une valeur approchée de la capacité d'échange en fonction des teneurs en argile et en matières organiques totales.

Nous avons d'abord recherché l'augmentation moyenne de la capacité d'échange en fonction de l'augmentation de la teneur en argile. Pour cela, nous avons établi le graphique p. 100 d'argile/CE dans les échantillons de sous-sol de 0 à 2 p. 100 de matière organique totale, afin de minimiser l'influence de l'humus. La méthode des moindres carrés a fourni, pour 120 échantillons conservés après élimination de 6 points très aberrants, la droite d'équation : $y = 2{,}1\ x - 4{,}0$ où y est l'argile p. 100 de terre fine sèche et x la capacité d'échange. On peut considérer le terme constant — 4,0 en partie comme la contribution moyenne de la petite quantité d'humus des sous-sols. En sol absolument dépourvu de matière organique, une quantité nulle d'argile entraî-

nerait une capacité d'échange pratiquement nulle. On peut donc poser que pour les sols du Caux, de l'Arrière-Caux et du Petit-Caux la CE due à l'argile est égale à 0,476 fois la quantité de celle-ci.

Cela étant, nous avons construit un second graphique reliant le p. 100 de matière organique totale de tous les échantillons à la capacité d'échange totale diminuée de la capacité d'échange attribuable à l'argile. Nous en avons tiré une seconde droite $y = 1{,}5\ x$ fournissant la capacité d'échange y, due à la matière organique x. On a tenu compte du fait qu'en l'absence d'argile, une quantité nulle d'humus correspond à une capacité d'échange nulle.

En définitive, la formule générale devient : $CE_T = CE_A + CE_H = 0{,}476\ a + 1{,}5\ h$.

La capacité d'échange globale est égale à 0,476 fois le pourcentage d'argile plus une fois et demie la quantité de matière organique.

Nous avons alors calculé la capacité d'échange de chaque échantillon et nous l'avons comparée à la capacité d'échange dosée.

Le graphique des différences $c - d$ (calculé — dosé) montre que celles-ci sont réparties de part et d'autre d'une ligne moyenne = 0, en grande majorité (80 p. 100) dans une bande — 1 +1. Autrement dit, sans aucune correction, on peut déduire exactement 4 fois sur 5 la capacité d'échange à ± 1 près à partir des quantités d'argile et de matière organique fournies par une analyse granulométrique bien faite.

Mais un examen détaillé des graphiques nous a montré qu'il existait une déviation systématique vers les différences négatives pour les horizons profonds des limons. Pour le Petit-Caux, le calcul des différences a été fait pour les sols arables, généralement 0 à 25 cm, notés *a* ; pour les premiers sous-sols, généralement 25 à 40 cm, notés *b* ; pour des sous-sols profonds un peu inférieurs à 1 m, notés *e* et pour des sous-sols de l'ordre de 1 m et plus, notés *f*. On trouve les différences ci-après en unités de CE (méq. pour 100 gr de sol) :

a : sol arable	moyenne	$c - d = + 0{,}01$
b : 1er sous-sol	—	$c - d = - 0{,}05$
e : sous-sol profond 1 m	—	$c - d = - 1{,}02$
f : sous-sol profond 1 m	—	$c - d = - 1{,}28$

Sur un graphique comportant en abscisse des traits a b c d e f équidistants et en ordonnées les différences $c - d$, on remarque que les points *b e f* sont sur une même droite et que *a* est voisin de cette droite. Autrement dit, la CE décroît d'une façon à peu près régulière pour une même teneur : argile + humus.

Comme la matière organique en profondeur est faible et peu variable, de l'ordre de 0,5 à 1 p. 100 et sans doute stabilisée, on peut en inférer que la variation de la CE provient d'une modification des propriétés de l'argile conventionnelle ($\leqslant 2\ \mu$) ce qu'il y aura lieu de vérifier ultérieurement.

En ce qui concerne les sols sur argiles à silex, dont nous avons prélevé quelques exemplaires en Petit-Caux, nous retrouverons le même phénomène d'abaissement de la CE en profondeur, mais avec cette différence que les premiers horizons sont au départ décalés positivement. Nous avons les moyennes ci-après :

a : sol arable	moyenne	$c - d = + 1{,}5$
b : 1er sous-sol	»	$c - d = + 1{,}2$
e : sous-sol profond	»	$c - d = - 0{,}6$

Sur le même graphique que précédemment, la chute apparaît plus brutale, mais il faut dire que les moyennes ne portent que sur 3 à 5 résultats par horizon.

En résumé, par rapport à la capacité d'échange globale calculée en supposant une valeur fixe pour l'argile (0,476 × argile p. 100) et pour l'humus (1,5 × mat. org. p. 100), on constate une augmentation pour les fortes teneurs en argile (argiles et biefs à silex) pouvant atteindre 1,5 en moyenne pour les sols et dans tous les cas, une diminution en fonction de la profondeur, pouvant atteindre 1,3 en moyenne pour les sous-sol de limon de profondeur égale ou supérieure à 1 m.

Si l'on corrige la CE calculée de ces déviations on obtient une valeur très approchée de la CE dosée.

Il est bien certain que la formule valable pour les limons du Caux et régions voisines serait à modifier pour des sols d'autres régions, dont le complexe absorbant serait constitué par des argiles différentes et, ou des matières organiques différemment évoluées. En particulier, beaucoup de sols du Pays d'Ouche nous ont fourni des valeurs de CE nettement plus élevées que celles calculées par la formule ci-avant. Nous nous proposons d'étudier ultérieurement ces différences dans le comportement des sols de l'Ouche.

Les bases échangeables dans le complexe

Pour tous les horizons examinés au point de vue capacité d'échange, une détermination des principaux cations : Ca, Mg, K et Na a été faite.

Une première constatation s'impose : même pour des terres moyennement acides, la teneur en calcium dosée par le laboratoire des sols d'Arras est très souvent supérieure à la différence entre la capacité totale d'échange et la somme des trois autres cations.

Pratiquement, il y a toujours un large excès de calcium par rapport aux autres cations, même en sols acides.

Parmi les sols qui ont une somme Ca + Mg + K + Na inférieure à la CE, environ 1/3 sont généralement acides, mais il n'y a pas de corrélation visible entre le pH et la différence : CE moins somme des cations, non plus qu'entre le pH et le pourcentage de calcium dans le complexe. Sans doute faudrait-il faire intervenir de multiples facteurs qui se contrarient.

Répartition des bases échangeables

Voyons maintenant la répartition du magnésium, du potassium et du sodium dans les complexes des sols du Petit-Caux. 96 échantillons ont été examinés à ce point de vue, sols et sous-sols. Le graphique ci-dessous en rend compte.

Potassium

La courbe des fréquences des différentes teneurs en potassium échangeables p. 100 de la CE est très dissymétrique, avec au début une forte quantité d'échantillons à 0,3 p. 100. Quelques rares sols ont jusqu'à 7 et 8 p. 100 de K dans le complexe absorbant. D'autre part, la comparaison entre les valeurs en K échangeable et les valeurs dosées au photomètre à flamme, après extraction par le réactif Morgan est assez bonne en *moyenne*. Dans la zone courante, on peut passer du K Morgan exprimé en p.p.m. par kg de terre au K milliéquivalents pour 100 grammes, par la formule $Ke = 0{,}3\ Km + 5$; étant entendu que les écarts *individuels*, en plus ou en moins peuvent être assez importants.

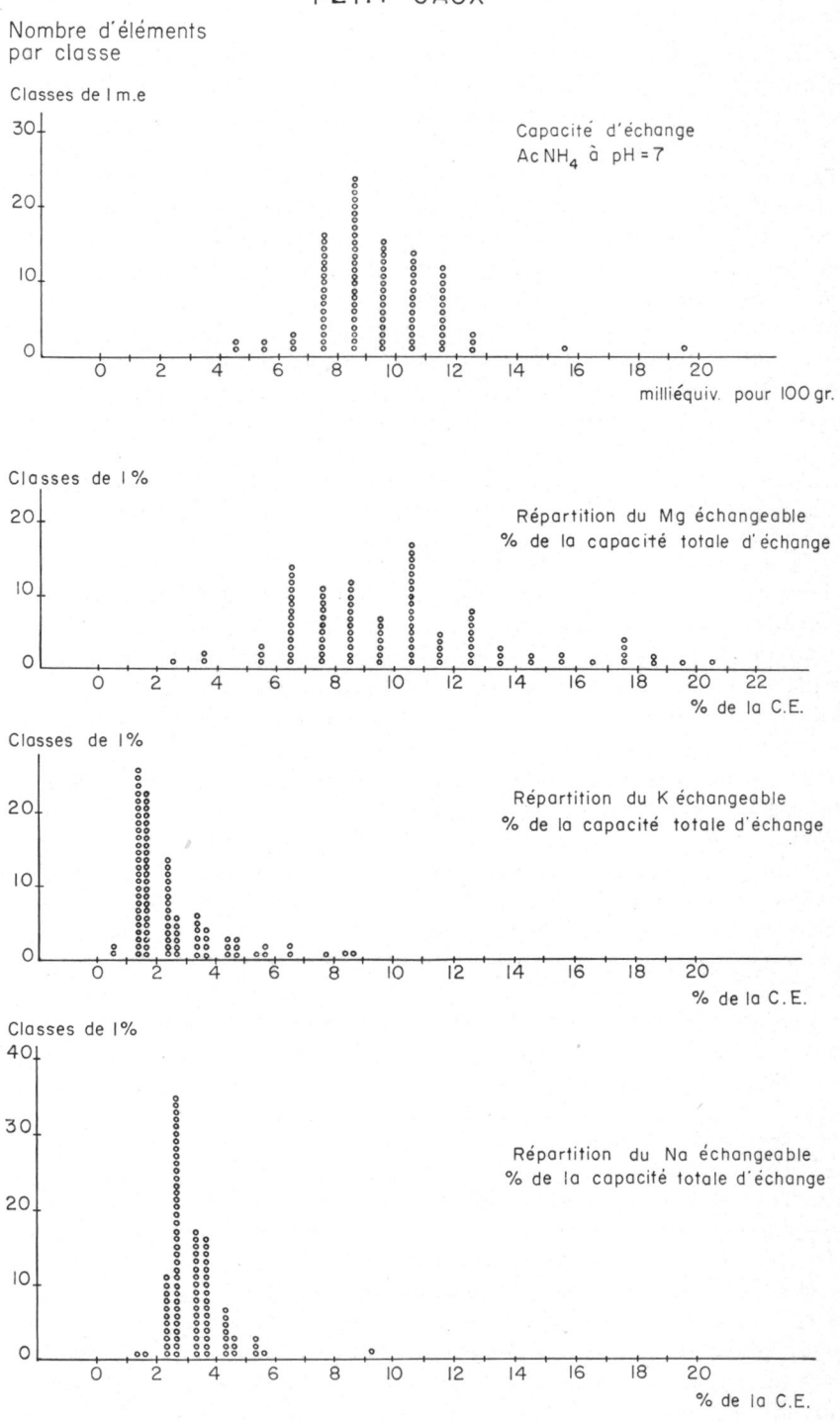

PETIT CAUX
Nombre d'éléments par classe
Classes de 1 m.e
Capacité d'échange
Ac NH4 à pH = 7
milliéquiv. pour 100 gr.
Classes de 1 %
Répartition du Mg échangeable
% de la capacité totale d'échange
% de la C.E.
Classes de 1 %
Répartition du K échangeable
% de la capacité totale d'échange
% de la C.E.
Classes de 1 %
Répartition du Na échangeable
% de la capacité totale d'échange
% de la C.E.

FIG. 3

Magnésium.

Cet élément est très variable, d'où une courbe de fréquence étalée de 2 à 20 p. 100 de la CE. Le maximum d'échantillons se retrouve entre 5 et 14 p. 100 et surtout vers 10 p. 100.

On a donc presque toujours plus de Mg que de K, malgré la faiblesse naturelle en Mg du limon et de l'amendement calcaire local.

Il est possible que les différences tiennent en grande partie à la nature de la fumure, car les scories Thomas sont utilisées depuis longtemps en Haute-Normandie, parfois à doses massives et les anciennes scories étaient assez riches en Mg.

Par ailleurs, depuis la deuxième guerre mondiale, les amendements magnésiens sont assez fréquement utilisés et l'analyse retrouve facilement les sols qui ont été renforcés en magnésium ainsi que nous l'avons constaté un grand nombre de fois.

De même que pour le potassium, on trouve *en moyenne* une correspondance nette entre le Mg échangeable et le Mg extrait par le réactif de Morgan. Pour l'ensemble des sols que nous avons étudié comparativement, le magnésium échangeable y en milliéquivalents pour 100 grammes est lié au magnésium x, évalué p.p.m. par kg de sol et dosé colorimétriquement par le jaune de thiazol, après extraction par le réactif Morgan, au moyen de la formule :

$$y = \frac{x\ (3\,700 - 9\ x)}{4.10^3}$$

Le soufre dans les sols du Petit-Caux

Dans notre étude sur une méthode néphélométrique rapide de dosage du soufre dans les sols (Jouis et Lecacheux, 1962) nous avions déjà donné quelques résultats de dosage en Seine-Maritime et notamment dans le Petit-Caux.

Nous avons réuni ci-dessous, dans un diagramme, quelques cas typiques de répartition du soufre dans les profils de cette région naturelle (graph. 4).

Rappelons que nous dosons habituellement le soufre sous trois formes :

1° le soufre soluble à l'eau (sulfates...). S'il y a dans l'extraction aqueuse, une quantité appréciable de matière organique en pseudo-solution, on la détruit par l'eau oxygénée, et le soufre ainsi obtenu est compté avec le S organique ;

2° le soufre de la matière organique, obtenu par attaque aussi complète que possible par l'eau oxygénée du sol lavé à l'eau ;

3° le soufre libéré par une attaque chlorhydrique assez forte, sur le résidu ayant résisté à l'eau oxygénée.

On peut estimer que l'ensemble de ces trois extractions représente le maximum des réserves de soufre du sol suceptible d'être exploité par les plantes à plus ou moins longue échéance. En fait, seul le soufre soluble et une petite partie du soufre organique est susceptible d'alimenter la plante au cours d'une saison de culture.

Sur le diagramme, nous avons séparé le groupe des labours, le plus important du groupe des prairies et de celui des prés-vergers.

Dans chaque profil, nous avons sélectionné trois couches représentatives :

1° sol, environ 0-25 cm ; 2° premier sous-sol, environ 25-40 cm ; 3° sous-sol profond ± 1 m.

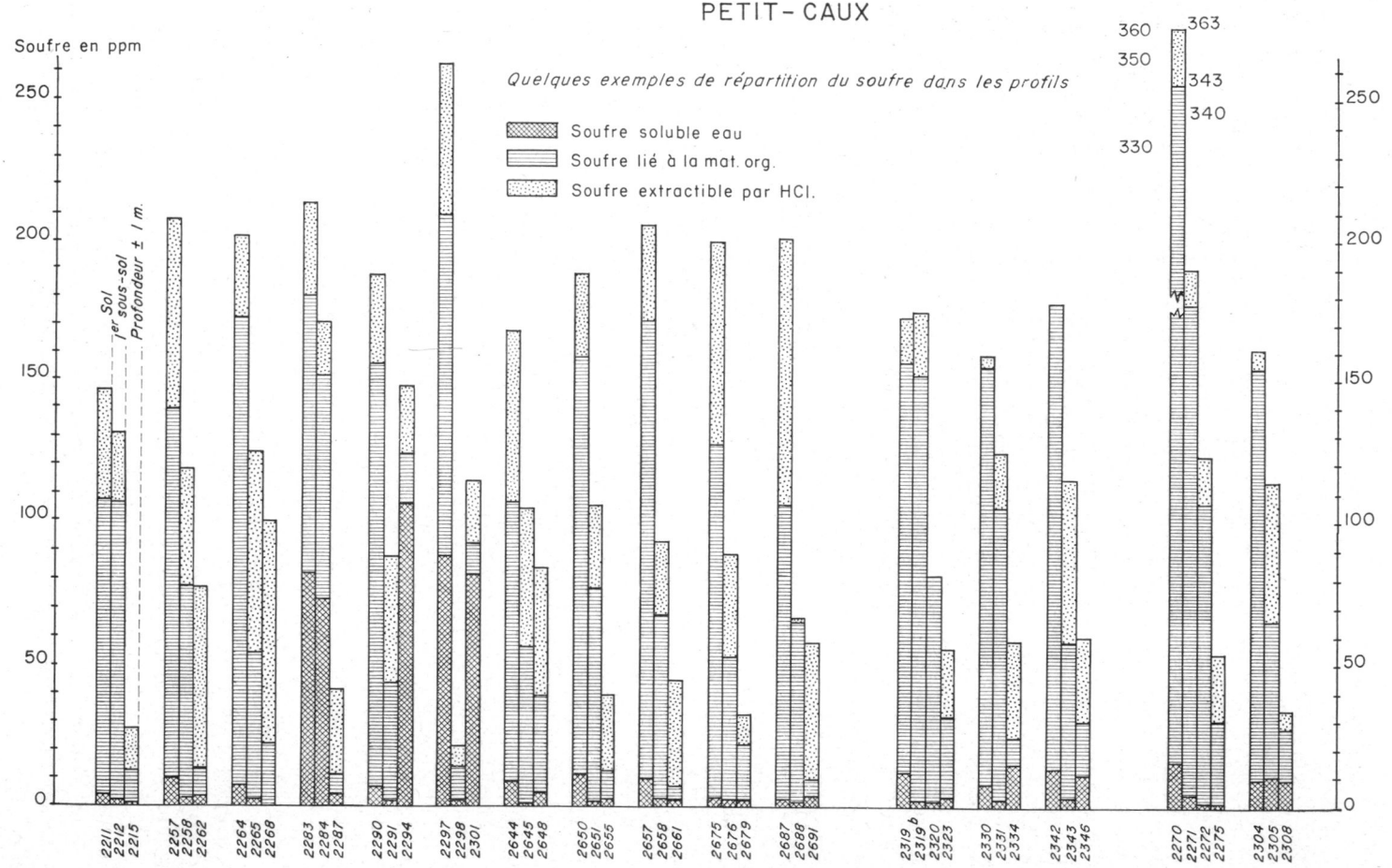

PETIT-CAUX
Quelques exemples de répartition du soufre dans les profils
Soufre soluble eau
Soufre lié à la mat. org.
Soufre extractible par HCl.
Soufre en ppm
Sol
1er sous-sol
Profondeur ± 1 m.
250
200
150
100
50
0
360
350
330
363
343
340
2211 2212 2215
2257 2258 2262
2264 2265 2268
2283 2284 2287
2290 2291 2294
2297 2298 2301
2644 2645 2648
2650 2651 2655
2657 2658 2661
2675 2676 2679
2687 2688 2691
2319 b 2319 2320 2323
2330 2331 2334
2342 2343 2346
2270 2271 2272 2275
2304 2305 2308

FIG. 4

Groupe des labours.

On remarque immédiatement que les teneurs en S soluble eau sont très variables, depuis des traces jusqu'à plus de 100 mg de S par kg.

D'autre part, les fortes teneurs, si elles existent, peuvent se trouver en un point quelconque du profil. Elles sont manifestement dues aux apports d'engrais sulfatés, notamment quand il y a eu culture de lin.

On peut aussi distinguer les agriculteurs qui emploient un engrais phosphaté sans soufre, de ceux qui utilisent le super. Les sols moyens sans engrais sulfatés ne dépassent guère 10 p.p.m. de S en surface et 2 à 3 en profondeur. S'il y a apport suivi d'engrais sulfaté, toutes les couches sont riches en soufre soluble. S'il y a apport intermittent, on peut aussi bien avoir beaucoup de soufre à 1 mètre et peu en surface que le cas contraire ou bien une couche riche entre deux couches pauvres ou l'inverse.

Le soufre solubilisé par H_2O_2 est d'autant plus élevé qu'il y a plus de matière organique, mais avec influence de la profondeur, comme nous le préciserons plus loin.

Quant au soufre encore récupérable par HCl 2,5 N à l'ébullition, on constate des teneurs variables de 5 à 100 mg par kg de sol, avec des valeurs usuelles de 30 à 60 mg.

Groupe des prairies et prés-vergers.

On remarque une absence de grosses quantités de S soluble à l'eau, manifestement due à l'absence d'engrais sulfatés. Les teneurs des sols sont généralement bonnes, 5 à 15 mg. Les sous-sols sont parfois pauvres, parfois comme le sol.

Le soufre organique est généralement abondant, ce qui est normal.

Le soufre récupérable par HCl, enfin, reste faible à moyen, généralement 15 à 35 mg.

En cas de retournement d'une prairie, la destruction partielle de la matière organique fournit du soufre soluble pendant plusieurs années.

Influence de la profondeur sur la teneur en soufre de la matière organique

Le soufre solubilisé par H_2O_2 est en rapport avec la quantité de matière organique et avec la profondeur. Pour les 16 profils examinés à ce point de vue, nous avons trouvé que dans les sols de prairie ou de pré-verger, le rapport 10^3 S/M.O. est voisin de 6,0 (5,7 à 6,3), la matière organique étant celle obtenue par perte au feu, corrigée du départ de l'eau de constitution de l'argile et éventuellement du CO_2 du calcaire.

Dans les premiers sous-sols de ces mêmes profils, le rapport s'abaisse à 4,5 et est plus irrégulier. Enfin, en profondeur $\pm$ 1 m, on arrive à environ 2,5.

Pour les labours, le rapport 10^3 S/M.O. dans les sols varie de 3,7 à 6,5 avec une moyenne voisine de 5. Les premiers sous-sols ont un rapport échelonné entre 3,3 et 5,2 avec une moyenne de 4,2. En profondeur $\pm$ 1 m, la variation est comprise entre 0,8 et 3,3 avec une moyenne de 1,7.

De ce qui précède, il apparaît que les matières organiques des sous-sols profonds sont moins riches en soufre que les matières organiques des sols, surtout s'il s'agit de sols enherbés.

L'AGRICULTURE DEPUIS LA FIN DU 19ème SIÈCLE JUSQU'A LA PREMIÈRE GUERRE MONDIALE

Le Petit-Caux a toujours été une région de polyculture avec une surface importante en herbe (actuellement environ 40 p. 100 des terres cultivées).

Comme nous le préciserons ultérieurement, on distingue une bordure littorale à climat plus marin et à terres plus légères, convenant bien aux cultures industrielles et une zone intérieure, à sols un peu plus argileux et convenant un peu mieux à l'herbe.

Dans la répartiton des exploitations que nous venons d'indiquer, il faut donc considérer que les domaines les plus étendus et les plus évolués se trouvent plutôt dans la zone littorale.

C'est dans cette zone que nous avons pu recueillir des informations un peu précises sur le mode de culture antérieur à la première guerre mondiale.

Si nous nous plaçons, par exemple, à Penly, à égale distance de deux limites Est et Ouest, nous constatons que les labours étaient divisés en 3 soles (comme maintenant), plus une surface en prairies permanentes.

Il y avait dans les bonnes fermes, environ 3/4 en labour et 1/4 en herbe, mais les labours comportaient une quantité appréciable de prairies de légumineuses, dont environ 3 p. 100 toujours en luzerne, coupée d'orge.

Pour fixer les idées, rapportons chaque culture à une ferme de 100 hectares, comme il en existe dans cette région.

Au début du xxe siècle, une telle ferme pouvait donc comporter 25 ha de prairies permanentes divisées en deux groupes :

a) 4 ha d'herbages plantés autour des bâtiments de la ferme ;

b) le reste était éparpillé sur les bords des falaises et quelques pentes de vallonnements.

Les 75 hectares de labours se répartissaient en 3 soles :

1° Une sole à blé de 25 ha,

2° Une sole en céréales secondaires et divers, par exemple :

Avoine	18	ha dont 10 tréflés
Seigle	2	ha pour liens
Colza	4	ha 1/2 colza d'hiver
Pommes de terre		1/2 ha pour la consommation

3° Une sole en trèfles, betteraves et divers, par exemple :

Trèfle de pays (trèfle violet)	10	ha
Betteraves fourragères	4	ha
Betteraves sucrières	5	ha
Vesces (pour les moutons)	3	ha
Pois (pour les chevaux)	2	ha
Divers	1	ha

En outre, environ 3 p. 100 des terres labourables étaient constamment en luzerne.

Voyons rapidement quel était le travail du sol et la fertilisation. Avant 1914 et également entre les deux guerres mondiales, tous les travaux se faisaient à l'aide de chevaux.

Un ferme de 100 ha comptait 2 attelées normales de 6 chevaux (des juments) dont deux gros animaux (race *Boulonnaise*) et une pouliche, puis deux chevaux de voiture.

Les labours, dans les limons, se faisaient au maximum à 18-20 cm, sauf pour le blé où l'on ne dépassait pas 8 à 10 cm.

Jusque vers 1905, on utilisait surtout la charrue à mancherons. Par la suite, le brabant se généralisa. Les charretiers étaient très exercés et rivalisaient entre eux pour la régularité des labours. L'emploi de chevaux permettait d'avoir un sol peu tassé et la vitesse lente formait des labours non émiettés.

Les façons secondaires étaient données par des « extirpateurs », puis, plus tard, avec appoint des « canadiens » à lames flexibles.

Les herses étaient à cadre de bois et les rouleaux étaient en fonte, très lourds.

En ce qui concerne la fumure, on utilisait de fortes doses de fumier et chaque commune avait 2 ou 3 troupes de moutons qui étaient parqués successivement sur les chaumes pendant plusieurs mois.

Le seul engrais très répandu était le nitrate de soude du Chili. On mettait un « filet d'azote » sur les blés au printemps.

Les agriculteurs plus évolués utilisaient du super et de la kaïnite pour les cultures industrielles et des scories Thomas sur les prairies.

Les traitements contre les mauvaises herbes n'existaient pas et on luttait par des façons culturales combinées au mieux, par la destruction des mauvaises graines triées à la batteuse et au tarare, par la confection de fumiers sains.

Malgré ces précautions le Petit-Caux payait un lourd tribut à la « sanve » (moutarde des champs, etc.) surtout dans les grandes fermes du littoral. Quand un hiver rigoureux décimait les blés, les champs étaient envahis par la sanve et la récolte tombait à zéro.

On inventait des astuces. Par exemple, après un semis d'orge, on guettait la levée des sanves et on hersait pour les déraciner sans cependant trop gêner la céréale.

Les betteraves étaient soigneusement binées, entre les lignes et sur les lignes. C'est à cette époque que les cultures sarclées méritaient vraiment leur nom.

Donnons maitenant quelques indications sur les diverses cultures.

Blé. — On distinguait encore plus soigneusement que de nos jours, les blés de betteraves, de pommes de terre, de trèfles, etc. suivant le précédent.

La semence était en blés de l'époque, par exemple *Golden Drop*, *Datel*. On mélangeait assez souvent les variétés ; suivant la faculté de tallage, on semait de 150 à 180 kg ; la récolte n'atteignant que 20 à 25 quintaux.

Jusque vers 1903, on récoltait à la faucheuse andaineuse à rateaux. La lieuse se répandit après cette date.

Le blé de trèfle représentait environ 10 ha pour une ferme de 100 ha. Le regain de trèfle était pâturé par les moutons au début d'octobre, puis on procédait au labour à blé, peu profond (8-10 cm) pour ne pas trop enfouir les déchets organiques et pour éviter de créer une terre creuse.

La potasse provenait de l'arrière-action des fumiers et du parc à moutons.

L'acide phosphorique provenait surtout des scories simples épandues sur les trèfles l'hiver précédent (600 kg dans les fermes d'avant-garde). On pouvait ajouter un peu de super en couverture au tallage. L'azote provenait des arrières-actions des fumiers et du « filet d'azote » au tallage, au maximum 200 kg /ha de nitrate de soude du Chili soit 30 unités.

Avoine. — Elle venait toujours, en principe, après le blé. On déchaumait fin novembre, début décembre, après le passage des moutons. Le labour se faisait à partir de janvier à 18-20 cm maximum à la vitesse maximum de 1 /2 acre local (75 ares) par jour. Quand la terre avait séché un peu (au moins 15 jours) on hersait pour briser un peu les billons.

Avant le semis, on ameublissait définitivement la terre à l'extirpateur. Vers 1906, on adjoignit le travail du canadien à lames flexibles. Puis on hersait. On passait 4 ou 6 fois en croisant. Les herses travaillaient en groupe, jusqu'à 6 ou 7, trainées chacune par un cheval.

Les bonnes exploitations terminaient par un croskillage (le croskill est relativement ancien). Semis en ligne au semoir Smith (datant de 1894) remplacé ultérieurement par le semoir Liot.

La variété longtemps la plus semée fut la *Ligowo*, à la dose de 14 boisseaux à l'acre de 75 ares. On obtenait un rendement de 15 à 18 quintaux.

Pas de fumure autre que l'arrière-action.

Orge. — Elle pouvait remplacer du blé, de l'avoine ou venir en troisième sole. On en faisait peu , 3 à 4 ha tous les 4 ans, surtout pour la volaille et en mouture pour les vaches à lait. Les porcs étaient peu nombreux et réservés à la consommation interne.

On récoltait 15 à 18 quintaux. Cette céréale était liée à la luzerne, à laquelle elle servait de plante-abri, en semant un peu clair.

Seigle. —Nous avons vu qu'il en était semé 2 ha pour 75 ha de labours. Après battage au fléau pour conserver la paille à liens, le grain donnait une mouture pour porcs. le seigle était lié au trèfle incarnat dont nous parlerons plus loin.

Pommes de terre. — Dans la région étudiée, la pomme de terre, placée en deuxième sole servait uniquement à la consomation intérieure, soit 1 /2 ha pour une ferme de 100 ha. On mettait un peu de fumier et de l'engrais.

Colza. — Toujours en deuxième sole, après blé de pois dans la ferme type étudiée. Le seul engrais était le fumier.

Lin. — A la place du colza, mais seulement 2 à 3 ha. On semait des lins de *Riga.*

C'était une culture noble, à laquelle on accordait des engrais minéraux, par exemple 600 kg /ha de superphosphate 16 p. 100, 3 semaines à 1 mois avant semis et de la potasse (kaïnite) avant le labour d'hiver. Pas d'azote. C'était surtout une culture littorale.

Trèfle de pays (trèfle violet). Le trèfle violet a toujours été très utilisé en Haute-Normandie, car il s'y plait. Il était alors pâturé au 3 /4 par les moutons et 1 /4 était réservé pour faire du foin.

Dans les bonnes fermes, la première coupe fin juin, pouvait fournir 900 bottes de 5 kg et la deuxième coupe, vers le 15 septembre, 400 bottes, soit au total 6 500 kg de foin de trèfle.

Le regain était mangé par les moutons, parqués au début d'octobre, avant les labours pour blé.

Après la récolte de l'avoine, le trèfle prenait son essor. On procèdait souvent à un pâturage léger en novembre, par des moutons parqués, pour fumer et tasser. On apportait en outre 600 kg de scories pures.

Une petite parcelle était réservée à l'obtention de la semence.

Trèfle incarnat. — Dans la région étudiée, la coutume était de semer toujours après seigle.

Après un coup d'extirpateur, un léger hersage et un roulage, on semait le trèfle à la main, un peu plus de 1/3 en trèfle incarnat hâtif, 1/3 en demi-hâtif et un peu moins en trèfle blanc, le plus tardif.

Il était pâturé par les chevaux, du début de mai au 14 juillet. Un emplacement était réservé pour la semence.

Betteraves sucrières. Cette culture dépendait beaucoup des possibilités de l'écouler sur une usine assez proche. Pour une ferme de 100 ha, on pouvait compter 5 ha de sucrières. C'est l'introduction d'une bascule de sucrerie en 1952-1953 dans cette région, qui a permis le développement de la betterave sucrière dans les petites exploitations, insuffisamment équipées en moyens de transport pour livrer à des distances importantes.

Après parcage des moutons sur l'avoine non tréflée, puis déchaumage, on portait le fumier puis on exécutait le gros labour en fin d'hiver.

Sur le labour, 600 kg de superphosphate se trouvait mélangé au sol par les dernières façons d'ameublissement. La graine était fournie par la sucrerie.

Après démarriage, on apportait 200 kg de nitrate du Chili souvent à la brouette semeuse, sur les routes de plantes.

Betteraves fourragères. — Par exemple, 4 ha pour 75 ha de labours. Travaux analogues à ceux de la betterave sucrière. On semait des 1/2 sucrières collet-vert ou collet-rose.

Pois; Vesces. — Ces cultures recevaient du fumier. Elles étaient semées séparément.

Les pois pour les chevaux, environ 2 ha.

Les vesces pour les moutons, environ 3 ha dans la ferme-type de 100 ha.

Nous avons déjà dit que le colza venait souvent sur blé de pois.

Traitement des prairies permanentes. — Dans les bonnes exploitations, on apportait 500 à 600 kg de scories Thomas 16 p. 100 tous les deux ans mais jamais d'azote. Quant au fumier, sauf dans de petites exploitations plutôt herbagères, il était réservé aux labours.

Étant donné la grosse nourriture issue des labours, on entretenait facilement deux gros animaux à l'hectare, en les passant successivement sur trois ou plusieurs prairies.

Les Bovins. — Sauf exceptions, on n'utilisait que la race *Normande* soit comme laitière, soit pour l'engraissement.

Étant donné la proximité de Dieppe, avec deux grandes huileries, on engraissait l'hiver au tourteau de lin (qui valait approximativement le prix du blé à poids égal).

Sur notre ferme-type de 25 ha de prairie, existait un troupeau d'environ 80 bovins, dont 15 à 18 laitières et des élèves d'âge échelonné. Il n'y avait pas de sélec-

tion à proprement parler mais on gardait de préférence les animaux de bonne conformation pour la viande.

Les Ovins. — Avant 1914, le mouton était un peu sélectionné. On utilisait le *Boulonnais* et le *Cauchois*. Les deux races étaient séparées au moment de la monte pour éviter les croisements.

Pendant 3 ou 4 mois, en automne jusqu'à fin décembre, les troupes vivaient sur les chaumes de la commune. En outre, nous avons vu qu'on leur semait des vesces. Ils avaient aussi du foin de trèfle et du tourteau de colza en buvées, etc.

Sur une ferme de 100 hectares, on pouvait trouver 180 moutons. La laine payait le berger. Les brebis donnaient en moyenne leur agneau par an.

Les porcs étaient réservés à la consommation et l'excédent des portées vendu. Cela nécessitait 2 ou 3 truies.

Les volailles. — Une centaine de poules servaient également à la consommation interne mais avec vente d'œufs assez suivie. La *Sussex* était déjà répandue.

Les chevaux — Toujours des juments pour le travail mais qui donnaient également des poulains. D'autres étaient achetés.

On mettait au travail à partir de 18 mois et les grandes fermes gardaient les animaux jusqu'à 5 ou 6 ans car la valeur était maximum à 5 ans., puis les revendait aux petites fermes. Les charretiers avaient souvent du mal à se séparer des animaux qu'ils avaient dressés.

Une exploitation de 100 ha disposait de 12 chevaux de trait de tous âges (18 mois à 6 ans) et de 2 chevaux de voiture.

Plusieurs petites exploitations n'avaient même pas de chevaux. Par exemple à Biville entre 1914 et 1939, 12 exploitations seulement sur 36 disposaient de chevaux, ce qui est quand même exceptionnel.

Ces petits cultivateurs ne mettaient guère d'engrais et ne faisaient pas de cultures industrielles (betteraves, lin...), mais parfois un peu de colza. Les labours étaient plus faibles. Avec trois chevaux, on pouvait cultiver jusqu'à 20 ha.

Personnel. — Une ferme-type de 100 ha comprenait deux charretiers, 2 domestiques de culture, 2 journaliers, 1 vacher, 1 berger, 2 bonnes, 1 femme de ménage, 1 laveuse, 1 boulangère deux fois par semaine. Le dernier four à pain de ferme à Penly a cessé d'être utilisé vers 1952.

L'AGRICULTURE EN PETIT-CAUX ENTRE LES DEUX GUERRES MONDIALES

Entre 1920 et 1939, on assiste à une lente transformation de la culture, mais elle se rattache plutôt à celle de 1914. En particulier, on utilise les chevaux.

Les labours sont poussés à 20-22 cm. L'emploi des engrais s'affirme, notamment à la suite des Belges arrivés dans le pays à cause de la guerre. Les grosses doses employées sur betteraves paraissent être de la folie. L'emploi de l'azote sur les céréales reste cependant modéré par crainte de la verse.

L'apparition du blé *Vilmorin 23* est un événement qui permet d'augmenter la récolte de grain de 4 à 5 quintaux. Le *Vilmorin 27* accentue l'avantage du Blé.

La culture du lin est défavorisée par rapport à celle du pays de Caux car les acheteurs réussissent à maintenir de bas prix, par exemple, 4 centimes le kilo contre 12 centimes dans le Pays de Caux. La situation ne changera qu'en 1951/52 après la création de la Coopérative linière d'Envermeu.

Les troupes de moutons diminuent. On trouve plus difficilement des bergers. L'utilisation du tourteau d'arachides se développe en concurrence ou en appoint au tourteau de lin.

LE PETIT-CAUX APRÈS LA DEUXIÈME GUERRE MONDIALE

Comme pour tous les secteurs du travail humain, la dernière guerre constitue un tournant important sur la route de l'évolution agricole.

Après une remise en état des exploitations qui dure 4 à 5 ans, on assiste à l'apparition des tracteurs, à partir de 1949, dans le Petit-Caux.

Vers 1954/55 les chevaux disparaissaient brusquement. La commune de Penly n'en compte plus qu'un seul en 1963.

Au début, ce sont des semi-diesels Lanz ou Société Française, rustiques, mais peu souples. Par la suite, se répandent les diesels Renault Mc Cormick et autres, d'abord des 35 chevaux ; parfois 25 CV en petites fermes.

Actuellement, des tracteurs légers, 35 CV, sont très répandus et conviennent bien aux limons proprement dits. Dans les fermes difficiles, avec sols lourds sur les pentes d'argiles à silex on utilise des 50 CV.

Les labours sont de l'ordre de 27 cm, au maximum 30 cm mais on approfondira peu à peu.

On a conservé la division des labours en trois soles, mais la rotation a été bouleversée par la disparition des chevaux et par ailleurs elle est devenue plus libre du fait des nouveaux moyens culturels, machines, engrais, semences, parasiticides... et aussi par suite des changements économiques rapides. Les moutons en troupes n'ont plus leur place sur les chaumes.

Les prairies ont été soignées comme les labours et ont pu même augmenter en surface. Par exemple une ferme-type de 100 hectares en zone littorale peut présenter 65 hectares de labours pour 35 hectarees de pâtures permanentes ou de longue durée.

Sur labours, on note le remplacement de l'avoine par l'orge, le développement de la pomme de terre de consommation pour la vente, et l'apparition, dans les très bonnes fermes de la culture du plant pour la semence, à partir de 1946/47, en bordure de mer (à cause de l'absence de pucerons). Au début, la production du plant avait également intéressé des fermes de l'intérieur, mais l'extension des maladies à virus a rejeté cette spéculation au voisinage immédiat de la mer.

Pour des raisons générales et surtout locales, les cultures industrielles (betteraves, lin...) s'intensifient.

Voyons quelle est la position actuelle des différentes cultures.

Blé. — Vient actuellement en seconde place dans la rotation. La grosse révolution

a été l'introduction de la variété *Cappelle*, à partir de 1954, qui a remplacé le *Vilmorin 27*. Le rendement augmenta de 10 q/ha. En moyenne, la production se situe maintenant entre 45 et 50 quintaux. En contre partie, la fumure est plus intense, notamment en azote (80 à 100 unités, de l'ammonitrate par fractions, au printemps). On n'apporte pas d'engrais phosphopotassiques si les autres cultures sont bien fumées, ou bien certains cultivateurs mettent un complet, par exemple 0-40-40 en couverture.

Le labour à blé reste le moins profond, mais atteint maintenant 12 à 15 cm.

La sole à blé est complète, par exemple 22 ha sur 66 ha de labour.

Orge. — Cette céréale vient en troisième place dans la rotation, avec le lin. Elle occupe les 2/3 de la sole et le lin 1/3 dans la ferme-type de Tocqueville-sur-Eu examinée.

La variété-type est *Rika*. On fume à 100 unités P_2O_5, 90 à 100 unités K_2O et 60 unités N. S'il s'agit d'une orge avec semis de luzerne on porte P_2O_5 à 150 kg et K_2O à 200 kg.

Lin à fibres. — Il s'agit actuellement de la variété *Wiera*, mais on commence à essayer des variétés un peu supérieures comme *Jade*.

La variété *Wiera*, contrairement aux variétés anciennes, supporte 25 unités d'azote en bordure de mer, à condition de fournir suffisamment d'acide phosphorique, par exemple 110 unités, du super, et de potasse, par exemple 200 kg du sulfate de K ou du Patent-kali.

Étant donné la baisse générale de l'humus dans les labours du Petit-Caux comme dans ceux du Caux, l'action de la « vieille graisse » se fait moins sentir, ce qui est une raison supplémentaire d'augmenter la fumure azotée.

Dans l'intérieur, pour un lin un peu moins fin et pour une forte fumure phosphopotassique, on peut aller jusqu'à 30 unités d'azote.

Betteraves. — Cette plante en compagnie de la pomme de terre est actuellement considérée comme tête de rotation.

Il s'agit de betteraves sucrières, plus un peu de fourragères (par exemple 1 ha).

Cette culture a été récemment très perturbée, avec l'année sèche de 1959, l'année excédentaire de 1960, puis le contingentement en 1961 qui avait réduit la surface jusqu'au 1/3. Actuellement la crise de Cuba revalorise la culture betteravière française qui est prévue à 60 p. 100 de la plus forte récolte antérieure pour 1963. C'est un assez bon exemple de l'influence de l'économie mondiale sur la rotation des cultures.

Depuis 1958, on note l'introduction des variétés polyploïdes. Les variétés hâtives ne sont pas supérieures aux variétés usuelles en ce qui concerne le tonnage. Les variétés tardives augmentent le rendement de 2 à 3 tonnes à l'hectare.

La betterave reçoit le fumier et une grosse fumure minérale.

Dans la ferme-type considérée, la stabulation libre où l'on conserve la litière, l'hiver, sous les bêtes, fait que le fumier, 35 à 40 t/ha est porté en septembre. Après le labour de fin d'hiver, l'un des plus profond (27 cm) on épand souvent 1 000 kg de 10-10-10, avec parfois un appoint de scories potassiques préalable, à l'automne.

Dans la ferme-type étudiée, on applique 150 kg P_2O_5 du super et 250 kg K_2O du chlorure, avant le labour, puis avant semis, 150 kg d'azote de la perlurée et d'un autre engrais.

En 1961 les rendements étaient de l'ordre de 64 t/ha correspondant à environ 10 100 kg de sucre à l'hectare.

Pomme de terre. — Dans les fermes produisant du plant de semence, il faut prendre des précautions spéciales d'isolement que je ne rappellerai pas ici. Il s'agit actuellement presque uniquement de grosses fermes du littoral. On peut trouver 10 ha de pommes de terre dont 2 ha de primeur et 8 ha de plant sur un labour total de 66 ha avec une rotation spéciale de 4 ans. La fumure est analogue à celle de la betterave.

Les variétés cultivées dans le Petit-Caux sont la *Bintje*, la *Sirtema* et la *B F 15* et les rendements sont pour la primeur et le plant de l'ordre de 15 t/ha.

Luzerne. — La luzerne est toujours cultivée hors sole. Autrefois, on la gardait 5 à 7 ans mais elle était finalement à l'état de prairie de graminées pour faire du foin. On resemait à nouveau de la luzerne, ou l'on passait par 2 ans de céréale secondaire. Actuellement on préfère tenir la luzerne 3 ans, mais en bon état.

L'année A, la luzerne *Flamande* est semée à 20-25 kg dans une orge assez claire (85 kg) mais fortement fumée. Si l'on utilise de l'avoine, on peut semer après la levée car la concurrence de la céréale est moins vive.

Avant l'hiver, on peut pratiquer un pâturage léger, si les ressources fourragères font défaut.

En année B, on fait deux ou trois coupes. Par exemple, première coupe fauchée avant floraison, deuxième après floraison (pour éviter le dépérissement), troisième quelquefois pâturée. L'année C est celle de pleine exploitation. L'année D est exploitée en deux coupes et le regain est enfoui, généralement pour betteraves.

En bordure de mer, la luzerne est beaucoup plus fréquente que le trèfle.

Prairies. — Les prairies permanentes par situation, (cour de ferme, certaines pentes...) sont maintenant mieux soignées.

La division des parcelles qui existait depuis longtemps dans le Petit-Caux, mais avec des surfaces assez grandes (plusieurs hectares) sont plus restreintes et l'emploi de la clôture électrique améliore encore l'exploitation.

Notons que l'herbe fauchée est rare en Petit-Caux, sauf si on emploie de grosses quantités d'azote. Toutefois, les refus sont fauchés une fois par an dans les bonnes fermes.

On n'aime pas ébouser, car ébouser c'est, dit-on, décupler la surface des refus. Par contre, à la sortie de l'hiver, on passe une herse légère pour éparpiller les bouses et surtout des cercles de roues pour détruire les monticules dus aux taupes, très nombreuses, malgré l'emploi de taupiers.

CONCLUSION

Il resterait beaucoup à dire sur l'agriculture du Petit-Caux, mais il faut se limiter.

En résumé, la nature de ses sols de limon, que nous venons de décrire, permet la plupart des spéculations agricoles propres aux terres du bassin parisien, plus celles spéciales aux bords de mer du Nord-Ouest, comme le plant de pommes de terre ou le lin à fibres de qualité.

Toutefois, ce sont surtout les circonstances économiques du monde agricole moderne qui dirigent les agriculteurs vers les cultures les plus rentables, ou encore possibles, compte tenu de la main-d'œuvre disponible en campagne.

Nous espérons que les précisions apportées par la présente étude sur les sols de ce terroir permettront aux agriculteurs et à leurs conseillers, en particulier à la Chambre d'Agriculture de la Seine-Maritime, de mieux apprécier les rapports entre l'économique et la technique dans le cadre du Petit-Caux.

Reçu pour publication en mai 1964.

SUMMARY

A TRANSITIONAL SOIL IN SEINE-MARITIME, LE PETIT-CAUX

After a brief historic description of the origins and development of the region now known as Petit-Caux, the geological formation of the plateau is suweyed and data are given both on the nature of the deep subsoil (clay with flints) affecting the moisture economy and on other relics of tertiary formations intervening in the formation of soils.

The main part of the study deals with the surface loams, originating directly or indirectly from aeolian deposits, which were subjected to a series of about 1.20 m deep sampling along four sectors perpendicular to the sea.

A brief description of the profiles in each sector, mainly supplying data of mechanical analyses at various depths, is followed by the authors conclusions and by a comparison of the possibilities of growing old-time and crops on these soils and of future trends.

ZUSAMMENFASSUNG

LE PETIT-CAUX, EIN ÜBERGANGSGEBIET IN DER SEINE-MARITIME

Nach einem historischen Rückblick zwecks genauer Festlegung des Ursprungs und der Ausdehnung der heute Petit-Caux genannten Gegend, geben die Autoren einen Überblick über die geologische Bildung dieses Plateaus sowie einige Einzelheiten über den für die Wasserbilanz äusserst wichtigen tiefen Untergrund (Ton oder restlicher Ton mit Kieseln), so wie über andere Überbleibsel der Tertiärbildungen, die im Laufe der Pedogenese vorkamen.

Das Hauptstudium ist dem Oberflächenlehm, unmittelbaren oder mittelbaren eolischen Ursprungs gewidmet, der durch eine Reihe von Bohrungen exploriert wurde (ugf 1,20 m tief), die sich auf vier dem Meer zu senkrechte Querschichten erstrecken.

Nach einer kurzen Beschreibung der Profile jeder Querschicht, hauptsächlich auf der Körnungsanalyse der verschiedenen Tiefenstuden fussend, fassen die Autoren ihre Feststellungen zusammen und vergleichen die Gegebenheiten des Gebiets mit den Kulturen der Vergangenheit, der Gegenwart und der in Zukunft möglichen.

РЕЗЮМЕ

Местность переходного характера — Малое Ко.

Е. ЖУИ, М. Т. ЛЕКАШЕ, техн. сотр. Ф. Мортэн. — Руан.

После краткого исторического напоминания, и чтобы точно очертить происхождение и постепенное расширение района носящего теперь наименование Малое Ко, авторы приводят краткое описание геологического образования этого плоскогорья и дают несколько уточнений о природе глубокой подпочвы (глина или кремневый бьеф), играющей

столь важную роль в экономике влаги, также как и о иных остатках образований третичного периода которые могли с'играть известную роль в почвообразовании.

Главный предмет изучения — поверхностный суглинок прямого или косвенного эолийского происхождения; он был исследован при помощи шурфов глубиной в 1,20 м. расположенных на четырех осях перпендикулярных к морю.

После краткого описания профилей каждой оси, основанного главным образом на гранулометрических анализах проведенных на различной глубине, авторы дают общую сводку наблюдений и сравнивают возможности традиционных культур этой местности с современными возможностями и тенденциями будущего.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOURCART J. *L'érosion des continents.* Coll. Armand Colin nº 318.

BRIOUX Ch., AGAFONOFF M. V. Étude sur les sols de limon de la Seine-Inférieure. *Ann. agron.*, 1931.

CAYEUX A. *La Géologie.* Presses universitaires de France. Coll. Que sais-je ? nº 525.

ENCYCLOPÉDIE LA PLÉIADE. « *La Terre* ». Gallimard, Paris. 1959.

FLINT. R. F. *Glacial and Pleistocène Geology,* John Wiky and Sons, New-York.

JOUIS E., LECACHEUX M. T. Le limon des plateaux de la région du Neubourg (Eure). *Bull. A. F. E. S.* 1956, 634-647.

JOUIS E. L'utilisation d'un Index lettré pour l'identification et la comparaison des textures des sols. *Bull A. F. E. S.*, 1961.

JOUIS E., LECACHEUX M. T. 1962. Une méthode néphélométrique rapide pour le dosage du soufre dans les sols. *Ann. agron.*, **13**, 353, 483-489.

LABOUNOUX et JANIN. *Carte des régions naturelles.* D.S.A., Rouen.

PASSY A. *Description géologique du département de la Seine-inférieure,* 1932.

PELLET M. Les prairies normandes. *Bull. des engrais,* 1937.

PINCHEMEL Ph.. *Les plaines de la craie.* Thèse, Libr. A. Colin. 1954.

SION J. *Les paysans de la Normandie orientale,* 1909.

Ann. agron., 1965, **16** (1), 91-106.

MISE AU POINT BIBLIOGRAPHIQUE

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE L'EAU LIBRE ET DE L'EAU ADSORBÉE

J. MAMY

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Après avoir rappelé quelques données théoriques relatives aux propriétés diélectriques des corps, on passe en revue un certain nombre d'applications des mesures diélectriques à l'étude de l'eau libre et de l'eau adsorbée sur divers composés minéraux et organiques.

INTRODUCTION

On connaît l'importance du rôle des phyllites gonflantes constituant la fraction fine du sol dans la fixation des cations et de l'eau ; l'étude du comportement des molécules ou des ions adsorbés à la surface des composés minéraux ou organiques, est donc susceptible de fournir des renseignements sur la fixation et la mobilisation des éléments du sol intervenant dans la nutrition des végétaux.

Il s'agit essentiellement de phénomènes de surface, et leur étude peut être élargie par une méthode de mise au point relativement récente : l'absorption diélectrique.

L'objet de cet article est de présenter cette méthode et de faire état d'un certain nombre de travaux relatifs à la structure de l'eau pure, et au comportement physico-chimique de l'eau adsorbée sur divers composés minéraux et organiques.

PREMIÈRE PARTIE

I. — La spectroscopie hertzienne. définition générale

La spectroscopie hertzienne suscite depuis 1945 un grand courant d'intérêt. L'utilisation à des fins d'analyse structurale des divers phénomènes d'absorption des ondes hertziennes, a permis de compléter nos connaissances sur la structure des corps solides, liquides et gazeux. D'une façon générale, on analyse les effets liés au passage d'une onde électromagnétique à travers le matériel étudié.

Une onde électromagnétique se propageant dans un milieu quelconque est définie par un vecteur champ électrique $\vec{E}$ et un vecteur champ magnétique $\vec{H}$.

La théorie de Maxwell définit l'induction électrique $\vec{D} = \varepsilon^* \cdot \vec{E}$ et l'induction magnétique $\vec{B} = \mu^* \cdot \vec{H}$, liées au déplacement des vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{H}$.

ε^* est la permittivité qui caractérise le milieu du point de vue électrique, et μ^* la perméabilité qui le caractérise du point de vue magnétique.

Dans les phénomènes liés aux propriétés diélectriques du milieu, le vecteur champ électrique joue le rôle fondamental puisque le passage du courant à travers un diélectrique est lié à l'induction électrique (ou déplacement électrique).

La structure facilitant plus ou moins le passage du courant, il apparaît des phénomènes d'absorption (en particulier l'A.D.D) qui constituent les données expérimentales essentielles de la méthode étudiée ici.

Nous rappellerons, dans cette première partie, les théories relatives à l'origine des pertes diélectriques dans les corps à l'état liquide ou solide.

II. — Origine des phénomènes d'absorption diélectriques

A. *Théorie macroscopique des pertes diélectriques*

Les propriétés des substances diélectriques sont généralement résumées dans l'expression de leur constante diélectrique ; celle-ci, dans le cas des champs électriques alternatifs, dépend de la fréquence, mais aussi de paramètres définissant l'état du matériel : température, état physique, etc.

Supposons le diélectrique placé entre les deux plaques d'un condensateur plan. Soit E le champ électrique, homogène dans le diélectrique et normal à la surface des électrodes ; il est lié à la d.d.p. entre les armatures distantes de d, par $E = \frac{V}{d}$; soit ε la permittivité du milieu, le déplacement électrique $D = \varepsilon \cdot E$, est lié à la densité de charge des plaques du condensateur. Lorsqu'on applique un champ électrique alternatif E, que l'on écrit sous une forme imaginaire usuelle

$$E = E_o \cdot e^{j\omega t}, \tag{1}$$

D est aussi périodique dans le temps, mais le déplacement des charges présente un certain retard par rapport à l'établissement du champ électrique : un déphasage δ (ou angle de perte) apparaît entre E et D.

On peut écrire :

$$D = D_o \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \tag{2}$$

Comme d'autre part :

$$D_o = \varepsilon_o \cdot E_o$$
$$\text{et} \quad D = \varepsilon \cdot E$$

les équations (1) et (2) conduisent à :

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cos \delta - j\, \varepsilon_o \sin \delta \tag{3}$$

Posons

$$\varepsilon_o \cos \delta = \varepsilon'$$
$$\varepsilon_o \sin \delta = \varepsilon''$$

l'équation (3) s'écrit :

$$\boxed{\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''} \tag{4}$$

ε^* est la constante diélectrique complexe, caractéristique du milieu soumis à un champ électrique alternatif de pulsation ω. On montre aisément que l'énergie dissipée dans le diélectrique s'écrit (BÖTTCHER, 1952) :

$$W = \frac{\omega \cdot E_o^2}{8\pi} \cdot \varepsilon''$$

ε'' est appelé facteur de perte ; le terme $\frac{\omega \cdot E_0^2}{8\pi}$ est constant pour une fréquence et un champ donnés ; les variations de ε'' en fonction des paramètres qui définissent le matériel, rendront compte des phénomènes énergétiques qui s'y déroulent.

Le diélectrique est équivalent à un système capacité-résistance en parallèle : ε'' est lié au terme conductif et ε' au terme capacitif.

$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ est le facteur de dissipation.

B. *Théories moléculaires des pertes diélectriques*

Les variations de la constante diélectrique complexe, donc les phénomènes de pertes dans les diélectriques, sont liés aux mouvements des charges, et aux phénomènes d'orientation des molécules.

α) *La théorie de* DEBYE

La théorie primitive établie par DEBYE pour les liquides admet que pour les hautes fréquences, les molécules, qui constituent des dipôles, freinées par les phénomènes de viscosité, ne peuvent s'orienter librement sous l'effet du champ électrique ; il en résulte une absorption d'énergie, liée aux frottements visqueux, qui se traduit par un maximum des courbes de ε'' tracées en fonction de la température ou de la fréquence.

Cette théorie donne à ε' et ε'' les expressions suivantes :

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_o - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\bar{\tau}^2} \tag{5}$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_o - \varepsilon_\infty) \cdot \frac{\omega\bar{\tau}}{1 + \omega^2\bar{\tau}^2} \tag{6}$$

ε_0 est la permittivité pour un champ statique.

ε_∞ est la permittivité pour une fréquence infinie.

$\bar{\tau}$ le temps de relaxation moléculaire.

$\bar{\tau}$ représente le temps mis par les dipôles pour acquérir à nouveau une distribution au hasard, après avoir été orientés par le champ électrique.

β) *La théorie de* FRÖHLICH

Des théories plus récentes ont permis d'étendre à un dipôle quelconque la théorie originale de DEBYE sur les liquides.

FRÖHLICH distingue en plus des possibilités de rotation des dipôles :

1° Des déplacements élastiques dus au fait qu'une charge liée à sa position d'équilibre peut vibrer selon une fréquence propre ; il se produit une absorption par résonance, que nous ne considérerons pas ici.

2° Des déplacements d'une position d'équilibre à une autre : une particule peut avoir deux positions d'équilibre séparées par une barrière de potentiel de hauteur U. En l'absence d'un champ électrique extérieur, l'énergie de la particule est la même dans les deux positions ; si un équilibre thermique existe, l'énergie moyenne d'une particule oscillant autour de sa position d'équilibre avec une fréquence ν_0, est $k \cdot T$ et $U \gg k \cdot T$: très peu de particules franchissent la barrière de potentiel.

Lorsqu'on applique un champ électrique extérieur, on modifie la probabilité de saut par dessus la barrière de potentiel. On peut d'ailleurs généraliser au cas des dipôles, en considérant que ceux-ci prennent diverses positions d'équilibre avec une certaine probabilité de passage de l'une à l'autre : le champ électrique modifie cette probabilité de transition, dont dépend le temps requis pour atteindre un nouvel équilibre. Selon cette théorie on peut ainsi définir un temps de relaxation :

$$\tau = \tau_o \cdot e^{U/kT}$$

$$\tau_o = \frac{1}{\nu_o}, \qquad e^{-U/kT} \text{ est le facteur de Boltzmann.}$$

La fréquence correspondant au maximum de ε'' est donnée par

$$\nu_c = \frac{1}{2\ \pi\tau_o} \cdot \frac{\varepsilon_\infty + 2}{\varepsilon_o + 2} \exp.\left(-\frac{U}{kT}\right)$$

$$\nu_c = A \exp.\left(-\frac{U}{kT}\right) \tag{7}$$

FREYMANN (1960) souligne la validité de cette théorie, quelle que soit l'origine du dipôle envisagé, même si ce dipôle est dû aux imperfections du réseau cristallin (BRECKENRIDGE, 1950-1952) ou aux impuretés chimiques (LIDIARD, 1953).

Il est toutefois important de bien souligner l'origine du phénomène d'absorption observé, celui-ci pouvant être :

1° L'absorption DEBYE par orientation dipolaire, qui est essentiellement le cas des liquides.

2° L'absorption DEBYE par défauts de réseau qui est le cas général des solides.

3° L'absorption par porteurs libres qui résulte du déplacement de charges + ou — indépendamment les unes des autres.

4° L'absorption par les phénomènes du type transitions de phases.

Nous reviendrons plus loin sur la caractérisation de ces différents cas.

III. — RÉALISATION DES MESURES. REPRÉSENTATION ET UTILISATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

A. *Principe des mesures*

Expérimentalement le problème se ramène à la détermination de la constante diélectrique réelle ε', et de l'absorption ε'' qui est proportionnelle à la conductivité. Pour un matériel déterminé, on peut faire varier la fréquence et la température : la gamme des fréquences peut s'étendre des ondes millimétriques (10^{11} Hz) aux ondes kilométriques ($< 10^5$ Hz). Les montages de mesure seront évidemment très différents suivant la région du spectre que l'on désire étudier.

Les mesures doivent être faites aussi en fonction de la température, car l'intervention des deux paramètres est indispensable à l'exploitation des résultats expérimentaux.

α) *En ondes kilométriques et hectométriques*

Le matériel étudié peut être placé entre les armatures d'un condensateur cylindrique ou d'un condensateur plan. Un dispositif approprié maintient le condensateur à des températures allant de environ 100° à 400°K (dans certains cas de 4° à 700°K).

Le calcul de ε' et de ε'' se fait à partir des valeurs de la composante capacitive C et de la composante conductive G mesurées à l'aide d'un montage classique du type pont d'impédance :

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_o}$$

$$\varepsilon'' = \frac{G}{C_o \cdot \omega}$$

où C_0 est la capacité du condensateur vide. Il faut évidemment tenir compte d'un certain nombre de corrections caractéristiques du dispositif expérimental utilisé.

β) *En ondes centimétriques*

Deux dispositifs sont principalement utilisés :

1° La cuve de mesure se trouve à l'extrémité du guide d'onde. Une sonde mobile permet de détecter la position des nœuds du système d'ondes stationnaires qui s'établit dans le guide. La comparaison de ces positions pour la cuve vide et pour la cuve remplie du corps étudié, permet le calcul de ε'' et de ε'.

2° La sonde est fixe. L'échantillon n'est plus en bout de ligne, le guide d'onde est fermé par un piston mobile dont on peut mesurer le déplacement longitudinal (LE BOT, 1954; LE MONTAGNER, 1951).

B. *Exploitation des résultats expérimentaux*

α) *La connaissance de* $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ *permet le tracé des différentes fonctions :*

$\varepsilon' = f(T)$, $\varepsilon'' = f(T)$, à fréquence constante.
$\varepsilon' = f(\nu)$, $\varepsilon'' = f(\nu)$, à température constante.
et $\operatorname{tg}\delta = f(T)$.

L'allure de ces courbes permet de distinguer le phénomène d'A.D.D. de la conductivité par porteurs libres, et des anomalies de ε' et ε'' dues aux changements de phases.

1° L'A.D.D. selon M. FREYMANN et *al.* (1954) présente les caractères suivants :

a) la courbe reliant la constante diélectrique à la température montre une inflexion pour la température correspondant approximativement au maximum de l'absorption.

b) Le maximum de la courbe $\varepsilon'' = f(T)$ se déplace vers les températures élevées quand la fréquence s'élève ; la valeur absolue de ce maximum varie peu avec la fréquence.

c) De même le maximum de la courbe $\varepsilon'' = f(\nu)$ se déplace vers les fréquences élevées quand la température s'élève.

Si le phénomène est bien du type A.D.D., il reste à préciser la nature des dipôles responsables.

2° *La conductivité par porteurs libres* se traduit par un accroissement considérable de ε'' vers les températures ordinaires et une décroissance très rapide de ε'' quand la fréquence augmente.

3° *Les phénomènes de changements de phases* sont caractérisés par le fait que la température correspondant à la variation brusque de l'absorption est indépendante de la fréquence.

β) *D'autres représentations graphiques peuvent être utilisées en ce qui concerne l'A.D.D.*

1° *La représentation de Cole et Cole.*

En éliminant $\omega^2\tau^2$ entre les équations (5) et (6), on obtient l'équation d'un cercle en axes rectangulaires ε' et ε''. Le tracé de cette courbe permet de connaître ε_0 et ε_∞ et met en évidence la distribution des temps de relaxation : chaque dipôle ayant son temps de relaxation propre en fonction de sa position, il peut en résulter une distribution autour de la valeur la plus probable.

2° *Le tracé des courbes* ε' *et* $\varepsilon'' = f(\log\omega)$ permet de connaître ε_0, ε_∞ et τ temps de relaxation moléculaire. τ se déduit de la position du maximum de ε'' par :

$$\tau = \frac{1}{\omega_m}$$

on peut aussi (FREYMANN, 1964) déduire de la valeur de ε''_m, le nombre de défauts du réseau cristallin et la mobilité des porteurs de charges.

3° *La représentation log* $\nu_c = f(T)$.

La relation (7) $\nu_c = A \exp - \left(\frac{U}{kT}\right)$ montre que la courbe log $\nu_c = f\left(\frac{1}{T}\right)$ doit être une droite, ce que confirme l'expérience. On peut alors calculer U qui est l'énergie d'activation du phénomène étudié, rotation de dipôles ou déplacement de défauts de réseau. A est un terme caractéristique du produit examiné.

IV. — Conclusion de la première partie

La méthode présentée est susceptible d'apporter de nombreux renseignements sur les modifications de structure des solides dues à des facteurs physiques ou chimiques, tels que température, pression, molécules polaires adsorbées, défauts de réseau, présence d'impuretés chimiques, etc. ; c'est la méthode de choix pour l'étude des propriétés semi-conductrices et des phénomènes de diffusion dans les solides, pour l'étude de l'eau de constitution, de cristallisation et d'adsorption, mais aussi pour l'étude des changements de phase et des phénomènes de catalyse.

Nous nous attacherons à présenter les données des études de conductibilité et d'A.D.D. ; il existe cependant d'autres phénomènes qui se superposent à ceux-là, en particulier l'effet Maxwell-Wagner (1914) lié à l'hétérogénéité des produits.

DEUXIÈME PARTIE

I. — Les propriétés diélectriques de l'eau pure (liquide et glace)

A. *La molécule d'eau*

Avant d'aborder l'étude des propriétés caractéristiques de l'eau liquide et solide, ou de l'eau adsorbée, nous croyons utile de rappeler quelques données sur la molécule d'eau :

La molécule d'eau a une forme angulaire, l'angle H — O — H vaut 105°. La distance OH vaut environ 1,98 Å, la distance H — H 1,55 Å. Le rayon moléculaire est de 1,38 Å.

Deux des électrons 2 *p* de l'oxygène forment des liaisons homopolaires avec les deux H. Les électrons du doublet libre sont dans le plan bissecteur de l'angle H—O—H ; Cette structure favorise la coordination tétraédrique des molécules d'eau à l'état cristallisé.

La molécule possède un moment dipolaire μ dirigé suivant la bissectrice extérieure de l'angle H—O—H : $\mu = 1{,}87 \cdot 10^{-18}$ U.E.S.C.G.S.

B *Structure de la glace*

Les atomes d'oxygène sont disposés dans une maille hexagonale où chacun d'eux est entouré de quatre atomes d'hydrogène, dont deux sont distants de 0,96 Å et deux de 1,80 Å.

La liaison avec les H les plus éloignés est une liaison hydrogène.

C *Les propriétés diélectriques de l'eau liquide*

L'eau liquide présente un phénomène d'A.D.D. en ondes centimétriques à la température ordinaire, avec une énergie d'activation de 0,22 *e*V.

Aux températures plus élevées une brusque montée de l'absorption traduit une conductivité par porteurs libres.

D *Les propriétés diélectriques de la glace*

La glace présente une A.D.D. en ondes kilométriques (Errera-Granier, 1924) avec une énergie d'activation de 0,58 *e*V (13,2 kcal/mole).

En ondes centimétriques, il apparaît une discontinuité de l'absorption lors du changement de phase à 0°C.

Les propriétés diélectriques de la glace pure ont été étudiées de façon suivie depuis 1924, et l'on sait depuis longtemps que les impuretés jouent un grand rôle dans la déviation des effets d'absorption par rapport à l'A.D.D. idéale.

Gränicher et *al.* (1957) ont entrepris une investigation complète de ces effets en fonction de T, ν, et du taux d'impuretés, ces dernières modifiant de façon considérable l'absorption Debye et l'absorption par porteurs libres de la glace pure : un deuxième maximum d'absorption apparaît à une fréquence moins élevée, sans que le maximum dû à l'A.D.D. de la glace soit affecté ; ce deuxième maximum se déplace vers des fréquences plus élevées lorsque le taux d'impuretés croît, il serait dû à des effets de charges spatiales de polarisation au voisinage des électrodes (Mac Donald, 1953).

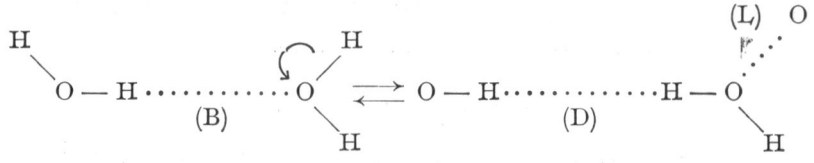
Ces observations ont conduit leurs auteurs à lier les propriétés diélectriques de la glace à l'existence de défauts de réseau dans le solide.

Il est de toute façon intéressant de connaître la nature des porteurs de charges dans la glace : selon Gränicher la conductivité est entièrement ionique et due à un mécanisme de transfert de protons, et Bjerrum (1951) montre que les propriétés électriques de la glace sont dues à deux types d'imperfections du réseau :

α) *Défauts orientationnels.*

Une molécule d'eau peut changer d'orientation par rotation autour d'une de ses quatre liaisons avec les molécules voisines, et de préférence autour des liaisons avec les H les plus proches.

Les deux liaisons normales —OH....O donnent une liaison doublement occupée —OH....HO— et une vacance —O....O—

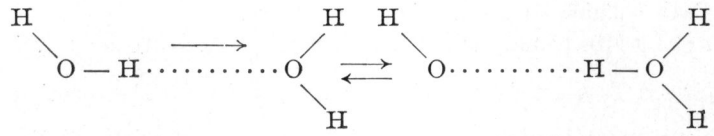


B : liaison normale
D : liaison doublement occupée
L : vacance.

Par rotation d'une molécule adjacente à un défaut D ou L, le défaut peut diffuser à travers le cristal. L'énergie de création d'un défaut orientationnel serait comprise entre 0,96 et 1,15 *e*V.

β) *Défauts translationnels*

Le déplacement d'un proton le long d'une liaison hydrogène peut entraîner la création d'un H_3O^+ et d'un OH^-, un tel défaut peut se propager d'une molécule à l'autre ; son énergie de création serait de 0,36 *e*V.



γ) *Conclusion.*

Les propriétés diélectriques observées pour la glace pure peuvent être attribuées au mécanisme de la liaison doublement occupée (D), mais la conductivité requiert un processus de transfert de protons sur une chaîne de molécules du cristal.

Cette théorie a le mérite d'avoir associé la notion de défauts de réseau à celle de liaison hydrogène, mais AUTY et COLE (1952) ont montré que la faible conductivité spatiale de la glace était un argument contre le mécanisme de sauts de protons suivis d'un réarrangement moléculaire ; ils proposent des réorientations moléculaires rendues possibles par des imperfections du réseau.

II. — LES PROPRIÉTÉS DIÉLECTRIQUES DE L'EAU ADSORBÉE

Comme nous l'avons indiqué plus haut, la spectroscopie hertzienne est particulièrement bien adaptée à l'étude des molécules adsorbées sur les solides, car elle permet d'atteindre un certain nombre de données sur leur mobilité, leur comportement vis-à-vis de l'adsorbant et leur arrangement structural.

Les premiers travaux publiés dans ce domaine, concernent l'étude de l'eau liée dans le réseau cristallin (FREYMANN et *al.*), mais il existe assez peu de données sur ce problème.

Depuis les travaux de GIRARD et ABADIE (1946) développés par ABADIE, CHARBONNIÈRE et GUILBOT (1953), l'eau adsorbée sur les solides a été abondamment étudiée.

Les premiers résultats des études de spectroscopie hertzienne ont permis de faire aisément la distinction entre eau libre, eau adsorbée et eau de cristallisation (FREYMANN et *al.*) :

— En ondes centimétriques, l'eau libre présente une A.D.D. à la température ordinaire, mais solidifiée à 0°C elle n'absorbe plus.

— L'eau adsorbée absorbe sans discontinuité à 0°C (pas de changement de phase).

— L'eau de cristallisation n'absorbe ni au-dessus, ni au-dessous de 0°C.

A côté de cette donnée essentielle, la spectroscopie hertzienne apporte des données complémentaires, que les travaux examinés maintenant mettent en évidence.

A. *L'eau adsorbée sur les gels de silice*

ROLLAND et BERNARD (1951), FREYMANN (1951), KUROSAKI (1952), montrent que l'eau adsorbée sur gel de silice présente deux régions d'absorption en ondes kilométriques à basse température, et en ondes centimétriques à température ordinaire : les positions des pics d'absorption sont fonction de la fréquence du champ électrique et de la teneur en eau.

KAMIYOSHI et RIPOCHE (1958) ont étudié les variations de l'énergie d'activation en fonction des quantités d'eau adsorbée, ce qui peut permettre de préciser le comportement de l'eau à l'aide de la théorie de BJERRUM.

LE BOT et LE MONTAGNER (1955) ont montré que la pente de la droite $\frac{P}{P_0} = f(T_{max})$, où T_{max} est la température du maximum d'absorption relative à l'eau adsorbée monomoléculaire, est très différente de celle relative à l'eau adsorbée multimoléculaire, et que le point d'intersection de ces deux droites est le point correspondant au volume Vm de la théorie de B.E.T.

Plus récemment LE BRUN et *al.* (1963), afin d'obtenir un spectre hertzien complet, ont utilisé, à température ordinaire, une gamme de fréquences allant de 1 Hertz à 50 GHz ; ils ont observé quatre ou cinq domaines différents d'absorption diélectrique ayant l'allure de domaines d'A.D.D., avec une distribution importante des temps de relaxation.

L'interprétation de ces expériences semble toutefois assez difficile car des données diélectriques, même précises, peuvent donner lieu à plusieurs interprétations. Les phénomènes mesurés pour les vapeurs adsorbées sur silicagel peuvent être expliqués par l'existence de libres rotations des molécules dans le plan de la surface de l'adsorbant, sans rotations normalement à cette surface : l'eau constituerait alors un liquide bidimensionnel ; mais on pourrait aussi admettre des rotations restreintes dans la troisième dimension (Mac INTOSH, 1951).

Un travail de JELLI (1964) présentant les propriétés diélectriques de la poudre de verre hydratée est à rapprocher des précédents. La poudre de verre hydratée se différencie des gels de silice par la présence de cations impuretés qui peuvent se localiser en surface sous forme d'hydroxydes. Les propriétés diélectriques sont étudiées, à fréquence et à température constante, en fonction des quantités d'eau adsorbée. JELLI observe que la conductivité ne devient mesurable qu'à partir d'un taux de recouvrement égal à 1 (surface couverte d'une couche monomoléculaire), pour un taux inférieur les molécules seraient immobiles. Pour que la conductivité apparaisse il faut que les porteurs de charges, protons ou cations, puissent se mouvoir, la mobilité de la molécule d'eau est donc nécessaire.

Des arguments thermodynamiques justifient la préférence de l'auteur pour le mécanisme de conductivité par protons ; le travail de formation du porteur de charge serait de 8,5 kcal.

B *L'eau adsorbée sur les argiles*

C'est pour nous un des aspects les plus intéressants de la question, car il est susceptible de nous apporter un certain nombre de précisions sur le comportement des minéraux qui sont parmi les plus importants dans la physico-chimie des sols.

Les propriétés diélectriques des films d'eau adsorbés sur les argiles sont d'un grand intérêt, car ces films sont formés de molécules dipolaires dont chacune est plus ou moins solidement liée à la surface adsorbante et aux molécules ou ions voisins.

En 1952, COWNIE et PALMER montrent que la constante diélectrique (à 430 MHz) d'une argile naturelle croît avec le degré d'hydratation, et que le temps de relaxation moyen des molécules décroît à mesure que le nombre de couches adsorbées augmente.

En 1953, FREYMANN signale l'existence d'une absorption de la bentonite dans le domaine des ondes centimétriques.

A partir de 1954, l'étude des argiles devient plus systématique.

MUIR (1954) mesure les pertes diélectriques dues aux films d'eau adsorbés sur la kaolinite, l'halloysite et la métahalloysite, dans une gamme de fréquences allant de 2,5 Hz à 25 MHz ; les valeurs maxima de ε'' des courbes $\varepsilon'' = f(\nu)$, et la fréquence correspondante, sont proportionnelles au nombre de molécules d'eau adsorbées, et dépendraient des forces de liaison qui s'opposent à l'orientation des dipôles dans le champ alternatif. Pour l'halloysite et la métahalloysite, MUIR observe un seul maximum qui croît et se déplace vers les hautes fréquences lorsque le taux d'humidité croît. La kaolinite présente deux maxima d'absorption : l'un à fréquence fixe, mais dont l'amplitude croît avec l'hydratation, l'autre d'amplitude constante mais se déplaçant vers les hautes fréquences.

Le talc, dont toutes les surfaces sont formées d'atomes d'oxygène, présente un seul type d'absorption à fréquence fixe. MUIR conclut que le maximum stationnaire de la kaolinite est dû à l'eau fixée sur les surfaces oxygène, et le second maximum à l'eau fixée sur les surfaces hydroxyle de ce même minéral. Seule la première couche adsorbée absorberait, et le déplacement du pic serait dû à l'influence des couches successives, ce qui indiquerait l'existence de liaisons entre ces couches (jusqu'à environ 5 couches).

PICKETT et LEMCOE (1959) ont aussi montré par RMN que la viscosité de l'eau au voisinage de la surface argileuse est supérieure à celle de l'eau libre, et qu'elle décroît uniformément avec la distance.

En 1960, GOLDSMITH et MUIR complétant le premier travail de MUIR, étudient des argiles saturées par différents cations : l'eau adsorbée serait d'autant plus ordonnée que les cations sont plus petits et qu'ils sont mieux fixés dans les cavités hexagonales du réseau.

Cependant l'interprétation des données expérimentales en fonction uniquement de l'eau adsorbée est insuffisante, elle peut être en partie compromise par l'existence de pertes diélectriques dues au cristal lui-même.

J. V. KEYMEULEN et W. DEKEYSER (1957) mesurant les pertes diélectriques d'une kaolinite déshydratée ,de 100 Hz à 20 MHz, observent des maxima des courbes $\mathrm{tg}\delta = f(\nu)$ pour tous les échantillons étudiés ; ces maxima, situés aux mêmes endroits que ceux de MUIR, seraient dus à des phénomènes de relaxation propres au minéral. De même BARON (1962) pour une kaolinite acide soumise à une humidité relative de 60 p. 100, observe deux maxima des courbes $\varepsilon'' = f(T)$. Le premier, situé entre 150° et 200°K, disparaît par chauffage à 100°C sous vide primaire, il serait donc bien dû à l'eau adsorbée.

Le second, situé vers 250°K, résiste au chauffage et serait dû à la présence de dipôles liés à des défauts de réseau.

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE - CHAIRE DE PHYSICO-CHIMIE ET SCIENCE DU SOL - CENTRE DE GRIGNON

Dans des domaines d'hydratation beaucoup plus élevée DEEG et HUBER (1955), par des mesures en ondes centimétriques, montrent que les propriétés diélectriques de l'eau dans la kaolinite peuvent être considérées comme identiques à celles de l'eau pure pour une teneur supérieure à la limite de plasticité (40 p. 100).

La montmorillonite a fait aussi l'objet de recherches récentes :

PONCELET (1964) effectue, à fréquence constante (1 592 Hz), des déterminations de constantes diélectriques en fonction de la teneur en eau, dans le but de préciser la mobilité des molécules d'eau adsorbées et la nature des porteurs de charges responsables de la conductivité électrique.

La conductivité spécifique σ, et la constante diélectrique ε' varient exponentiellement en fonction du taux de recouvrement θ de la surface (dans les limites du recouvrement monomoléculaire pour la montmorillonite Na et bimoléculaire pour la montmorillonite Ca). L'absorption de l'énergie électrique serait due essentiellement à la présence de porteurs libres, protons ou cations.

L'existence d'une relation exponentielle entre σ et θ, et le fait qu'il existe une relation simple entre le nombre de porteurs de charges et le degré d'hydratation de la surface, peuvent aussi bien s'interpréter en admettant la mobilité du proton ou du cation, à condition que ce dernier se propage à l'état hydraté. La comparaison des résultats précédents avec ceux obtenus pour un gel de silice entraîne la préférence de l'auteur pour une conductivité protonique.

CREMERS (1964) et CREMERS et LAUDELOUT (1964), en ce qui concerne les gels de montmorillonite, soutiennent l'hypothèse d'une conductivité de surface par cations ; ces auteurs ont étudié les propriétés diélectriques des gels de montmorillonite à fréquence constante (1 592 Hz), mais en fonction de la concentration en argile, de la concentration de l'électrolyte, de la nature du cation saturant la capacité d'échange et de la température.

Après avoir calculé le facteur de formation (ou tortuosité) du gel et les coefficients de diffusion des ions, les auteurs analysent l'influence de la concentration en argile et de la concentration de l'électrolyte sur l'énergie d'activation de la conductivité ; celle-ci, en l'absence d'électrolyte, passe par une valeur minimum pour une certaine concentration en argile : environ 20 p. 100 pour la montmorillonite Na et 40 p. 100 pour la Ca (il n'y a pas de minimum pour la kaolinite). L'influence de la nature du cation est également discutée : la conductivité (donc la mobilité du cation) croît du Ca au Na, et c'est l'inverse qui se produit en solution pour des sels de ces cations ; d'autre part, l'énergie d'activation de la conductivité électrique d'un gel à 55 p. 100 d'argile montre une très bonne corrélation avec la polarisabilité du cation.

Ces observations conduisent CREMERS et LAUDELOUT à considérer que la mobilité de surface des ions sur la montmorillonite, est liée à leur volume cristallographique, alors qu'en solution c'est le volume de l'ion solvaté qui intervient.

C. *Conclusion des paragraphes A et B*

Il semble bien que les deux premières couches d'eau adsorbées sur gel de silice et sur argile aient des structures similaires. L'arrangement moléculaire de l'eau n'a pu être précisé avec certitude : il n'est certainement pas celui de la glace, bien que la distribution normale des électrons à l'intérieur des molécules soit toujours favorable à une coordination tétraédrique.

Le degré d'ordre décroît à mesure que l'on s'éloigne de la surface, et la nature des cations adsorbés intervient dans la régularité de la structure : si leur taille et leur charge sont élevées ils provoquent un certain désordre.

Un modèle de structure à deux dimensions semble apporter l'interprétation la plus convenable aux diverses propriétés électriques observées (plus qu'une fixation des molécules d'eau sur des sites particuliers).

Le mécanisme de la conductivité électrique est lié à l'existence de porteurs libres, mais s'agit-il d'une conductivité par cations ou par protons ? La nature du porteur de charge dépend peut-être de l'état d'hydratation du minéral, un mécanisme protonique pouvant intervenir pour les faibles humidités et un mécanisme cationique pour les états très hydratés.

D. *L'eau adsorbée sur des composés organiques ou biologiques*

C'est un domaine très vaste, mais encore peu exploré.

L'humidité des bois (TAKEDA, 1951), le rôle de l'eau dans les tissus animaux, l'eau fixée sur les protéines et la cellulose ont été étudiés par spectroscopie hertzienne. Nous citerons en exemple les travaux de ABADIE, GIRARD et *al.*, qui ont été parmi les premiers à utiliser cette méthode dans le domaine biologique. En 1953, ils étudient l'eau adsorbée sur l'amidon dans une gamme de fréquence allant de 25 Hz à 24 000 MHz, et pour des états d'hydratation allant de 0,6 à 20,5 p. 100 du poids sec. L'amidon présente un maximum d'absorption diélectrique en ondes métriques jusqu'à une teneur en eau de 15,5 p. 100, ensuite un deuxième maximum apparaît. Le premier maximum existe aussi pour l'amidon sec, tout se passe donc comme si l'eau n'avait pas d'absorption propre jusqu'à 15,5 p. 100 ; au-dessus de cette valeur l'eau deviendrait mobile et pourrait participer à des processus d'hydrolyse.

Plus récemment CHARBONNIÈRE et *al.* (1962) ont entrepris l'étude du rassissement de la mie de pain : les mies fraîches et rassies présentent une absorption diélectrique du type DEBYE avec un seul maximum ; cette absorption est imputable aux oxhydriles du glucose et de l'amidon.

Pour les produits anhydres il n'apparaît pas de différences sensibles entre les états frais et rassis, mais pour les états réhydratés, le rassissement se traduit par un abaissement très notable de la valeur du maximum d'absorption.

Le phénomène serait dû à une réorganisation de la structure du réseau des chaînes macromoléculaires de l'amidon au cours du rassissement, ce qui correspondrait à une augmentation de la cristallinité du système.

Ces deux exemples montrent assez nettement l'intérêt que présenterait un élargissement des recherches dans ce domaine, où le nombre de travaux existant actuellement est très réduit.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de cet exposé bibliographique sur la méthode diélectrique, on peut être surpris de ne pas trouver de résultats plus précis au sujet des phénomènes étudiés.

La difficulté vient de ce qu'il n'existe pas de théorie complète de l'absorption

diélectrique. Les systèmes étudiés ne suivent pas exactement les théories simples que nous avons exposées au début : les effets parasites du type MAXWELL-WAGNER, les anomalies de la constante diélectrique liées aux changements de phase ou aux phénomènes de résonance, se superposent à l'effet DEBYE proprement dit. Cette superposition de plusieurs effets dans un même domaine spectral rend évidemment plus difficile l'analyse des résultats expérimentaux.

La méthode diélectrique est cependant bien adaptée à l'étude des interactions adsorbat-adsorbant. Le domaine spectral utilisé correspond en effet aux énergies et aux fréquences caractéristiques de certains états de l'eau libre et de l'eau adsorbée que d'autres techniques ne permettraient pas d'atteindre. Ajoutons que les mesures des propriétés diélectriques sont relativement aisées et ne nécessitent pas un matériel très compliqué ni très onéreux, surtout en ce qui concerne les ondes hectométriques et kilométriques.

Il reste bien entendu les difficultés théoriques, mais celles-ci ne doivent pas arrêter les chercheurs désireux d'accroître ou de compléter des données expérimentales, par une méthode susceptible d'apporter des renseignements importants dans le domaine des défauts de réseau physiques ou chimiques et dans le domaine de l'adsorption.

Reçu pour publication en mars 1965.

SUMMARY

STUDY OF THE DIELECTRIC PROPERTIES OF FREE AND ADSORBED WATER

The first part deals with theories on the process of dielectric adsorption, and with the nature of measurements made and experimental designs used in various ranges of wave length. The usual reporting of experimental results and their utilization are shown.

In the second part, after a brief account of essential data on the structure of water and ice there follows a review of works on

1) The dielectric properties of pure water and ice, and

2) The water adsorbed on silica gels, clays and certain organic compounds.

In spite of theoretical difficulties, the method yields valuable information on the problem of defects in the physical and chemical network, and on the behaviour of molecules adsorbed on solid surfaces.

ZUSAMMENFASSUNG

EINE LITERATURUBERSICHT : STUDIUM DER DIELEKTRISCHEN EIGENSCHAFTEN DES FREIEN UND DES AUFGENOMMENEN WASSERS

Im ersten Teil werden die Theorien über dielektrische Absorptionserscheinungen in Erinnerung gebracht. Die Art der getätigten Messungen und die Versuchsanordnungen für die verschiedenen Wellenlängen werden näher bestimmt. Dann werden die Versuchsergebnisse und ihre Anwendung vorgetragen.

Im zweiten Teil, nach Erinnerung der Hauptdaten über die Struktur des Wassers und des Eises befasst sich der Verfasser :

1° Mit Arbeiten über die dielektrischen Eigenschaften des reinen Wassers und des Eises.

2° Mit Arbeiten über Wasser, das auf Kieselgel, Ton und verschiedenen organischen Verbindungen adsorbiert wird.

Trotz theoretischer Schwierigkeiten gibt die Methode wertvolle Aufschlüsse über das Problem der Fehler des physikalischen und chemischen Gitters und über das Verhalten der adsorbierten Molekeln an der Oberfläche der festen Körper.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАМЕТКА

Изучение диэлектрических свойств свободной и адсорбированной воды.

Ж. МАМИ.

РЕЗЮМЕ

В первой части своего труда автор напоминает существующие теории о феноменах диэлектрической адсорбции, уточняет сущность проведенных измерений и экспериментальные диспозиции применяющиеся для волн различной длинны, и приводит обыкновенные изображения достигнутых результатов и их практического применения.

Во второй части, перечислив главные данные о структуре воды и льда, автор разбирает :

1. Работы посвященные исследованиям диэлектрических свойств воды и льда.

2. Работы по вопросу воды адсорбированной на кремнистых гелях, глинах и некоторых органических соединениях.

Несмотря на теоритические трудности, этот метод доставляет ценные сведения о деффектах физических или химических сетей и о поведении моллекул адсорбированных на поверхности твердых тел.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABADIE P., CHARBONNIÈRE R., GIDEL A., GIRARD P., GUILBOT A. 1953. L'eau dans la cristallisation du maltose et du glucose et états de l'eau de sorption de l'amidon d'après les spectres d'absorption en radiofréquences. *J. Chim. Phys.* **50**, Colloque C.N.R.S., n° 53, C 46-C 52.

AUTY R. P., COLE R. H., 1952. Dielectric properties of ice. *J. Chem. Phys.*, **20**, 1309-1314.

BARON A., SIERRA R., 1962. Étude de la fixation de l'eau sur des kaolinites homoioniques par spectroscopie hertzienne. *C. R. Acad. Sci.*, **255**, 2075-2076.

BJERRUM N., 1951. Structure and properties of ice. *Dan. Mat. Fys. Medd.*, **27**, nr 1.

BRECKENRIDGE R. G., 1950. Low frequency dispersion in ionic crystals. *J. Chem. Phys.*, **18**, 913.

BRECKENRIDGE R. G., 1952. In : *Imperfections in nearly perfect crystals*, 219, Wiley, New York.

BÖTTCHER C. J. F., 1952. In *Theory of electric polarisation*, 228-233, Elsevier, Amsterdam.

CHARBONNIÈRE R., GUILBOT A., 1962. Étude du rassissement de la mie de pain par spectroscopie hertzienne. Caractérisation de l'état rassis. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 4444-4446.

COLE K. S., COLE R. H., 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J. Chem. Phys.* **9**, 341.

COWNIE A., PALMER L. S., 1952. The dielectric constant of water in wet clay. *Proc. Phys. Soc.* **B 65**, 674-678.

CREMERS A., 1964. *Electrical conductivity of clay gels.* Thèse Univ. Cath. Louvain.

CREMERS A., LAUDELOUT H., 1964. Surface conductivity in clay gels. *J. Chem. Phys.* (Sous presse).

CREMERS A., LAUDELOUT H., 1964. Conductivité électrique des gels argileux en fonction de la température. *C. R. Acad. Sci.* **259**, 1975-1977.

DEBYE P., 1929. In *Polar Molecules*, 172 p., Dover Publications, New York.

DEEG E., HUBER O., 1955. Dielektrische Eigenschaften einiger Tonmassen im Dezimeterwellengebiet in Abhängigkeit vom Wassergehalt. *Ber. D. K. G.*, **32**, 261-272.

FREYMANN M., FREYMANN R., 1951. Absorption dans l'ultrahertzien et liaison hydroxyle. Eau de cristallisation et eau d'adsorption. *C. R. Acad. Sci.*, **232**, 401-403.

FREYMANN R., 1953. Absorption dans le spectre hertzien de l'eau libre et de l'eau liée. *J. Chim. Phys.* **50**, *Colloque C.N.R.S.*, nº 53, C 28-C 34.

FREYMANN M., FREYMANN R., 1953. Spectre hertzien et structure des solides : I. Absorption DEBYE des solides dans le spectre hertzien et défauts de réseaux. *J. Phys. Rad.*, **14**, 203-211.

FREYMANN M., FREYMANN R., 1954. Spectre hertzien et structure des solides : II. Absorption DEBYE de l'eau libre et de l'eau liée. *J. Phys. Rad.*, **15**, 165-175.

FREYMANN M., LANGEVIN S., ROLLAND-BERNARD M. T., 1954. Spectre hertzien et structure des solides III. Recherches préliminaires sur les composés non stœchiométriques : oxydes d'Uranium. *J. Phys. Rad.*, **15**, 82-91.

FREYMANN R., SOUTIF M., 1960. In : *La spectroscopie hertzienne appliquée à la chimie*, 31-79, Dunod, Paris.

FRÖHLICH H., 1958. In : *Theory of dielectrics*, 192 p., Clarendon Press, Oxford.

GIRARD P., ABADIE P., 1946. B. Theory of relaxation times. Experimental curves of losses and of anomalous dispersion as a basis of a spectral method. *Trans. Far. Soc.*, **42** A 40-47.

GOLDSMITH B. J. MUIR J., 1960. Surface ion effects in the dielectric properties of adsorbed water films. *Trans. Far Soc.*, **56**, 1656-1661.

GRÄNICHER H., JACCARD C., SCHERRER P., STEINEMANN A., 1957. Dielectric relaxation and the electrical conductivity of ice crystals. *Dis. Faraday Soc.*, **23**, 50-62.

JELLI A., 1964. *Caractéristique semi-conductrices de la poudre de verre hydratée.* Lab. Chimie minérale, Inst. Agron. de l'Univ. Cath. Louvain.

KAMIYOSHI K. I., 1958. Absorption dielectrique de l'eau adsorbée sur silica gel. *J. Phys. Rad.* **19**, 943-946.

KUROSAKI S., 1952. Dielectric properties of adsorbed water on silica gel. *J. Chem. Soc. Japan, pure chem. sect.*, **73**, 606-610.

LE BOT J., 1954. *Mesure de la constante diélectrique complexe.* Thèse Fac. Sci. Paris.

LE BOT J., LE MONTAGNER S., 1955. La méthode diélectrique, nouveau procédé d'étude de l'adsorption de l'eau. *J. Phys. Rad.*, **16**, 163-164.

LEBRUN A., LIEBAERT R., FONTAINE J., RISBOURG A., 1963. Sur l'existence dans les gels de silice et les zéolites de nombreux domaines d'absorption diélectriques aux fréquences hertziennes. *C. R. Acad. Sci.*, **256**, 5334-5336.

LIDIARD A. B., 1953. *Tech. Report Contract.*, N. R. 017.413, Univ. Illinois, Urbana.

LE MONTAGNER S., LE BOT J., 1951. Un nouvel abaque pour la détermination de la constante diélectrique et de l'absorption en ondes centimétriques. *C. R. Acad. Sci.*, **233**, 1017-1019.

MACDONALD J. R., 1953. Theory of a.c. space charge polarization effects in photoconductors, semiconductors and electrolytes. *Phys. Rev.*, **92**, 4-17.

MC INTOSH R., RIDEAL E. K, SNELGROVE F. R. S. and J. A., 1951. The dielectric behaviour of vapours adsorbed on activated silica gel. *Royal Soc. London Proc.*, **208 A**, 292-310.

MUIR J., 1954. Dielectric loss in water film adsorbed by some silicate clay minerals. *Trans. Far. Soc.* **50**, 249-254.

PICKETT A. G., LEMCOE M. M., 1959. An investigation of shear strengh of the clay-water system by radio-frequency spectroscopy. *J. Geophys. Res.*, **64**, 1579-1586.

PONCELET G., 1964. *Etude de l'eau adsorbée par les montmorillonites par des mesures d'entropie et de conductivité électrique.* Thèse Univ. Cath. Louvain.

ROLLAND M. T., BERNARD R., 1951, Absorption dans le domaine des ondes kilométriques de l'eau adsorbée. *C. R. Acad. Sci.*, **232**, 1098-1099.

TAKEDA M., 1951. Dielectric behaviour of bound water in timber. *Bull Chem. Soc. Japan*, **24**, 169.

Van KEYMEULEN J., DEKEYSER W., 1957. Dielectric loss of and defects in clay minerals. *J. Chem. Phys.* **27**, 172-175.

WAGNER K. W., 1914. Erklärung der dielektrischen Nachwirkungs vorgänge auf Grund Maxwellscher Vorstellungen *Arch. Elektrotech.* **9**, 371-387.

Ann. agron., 1965, **16** (1), 107-118.

NOTES TECHNIQUES SUR UN APPAREIL SEMI-AUTOMATIQUE DE DOSAGE DE L'AZOTE (ET DE CERTAINS COMPOSÉS VOLATILS)

A. BOUAT et Mme C. CROUZET

Laboratoire de Chimie,
École nationale supérieure agronomique, Montpellier (Hérault)

SOMMAIRE

L'appareil présenté pour le dosage de l'azote ammoniacal en particulier (et l'azote organique après kjeldahlisation) se différencie des appareils habituels par la suppression de l'entraînement classique à la vapeur d'eau et son remplacement par un courant d'air.

Ce processus présente l'avantage de ne diluer qu'au minimum le liquide de titrage, puisqu'il n'y a plus condensation de la vapeur d'entraînement. De ce fait, les titrages sont beaucoup plus nets et peuvent être réalisés au 1/100 de mg d'azote près.

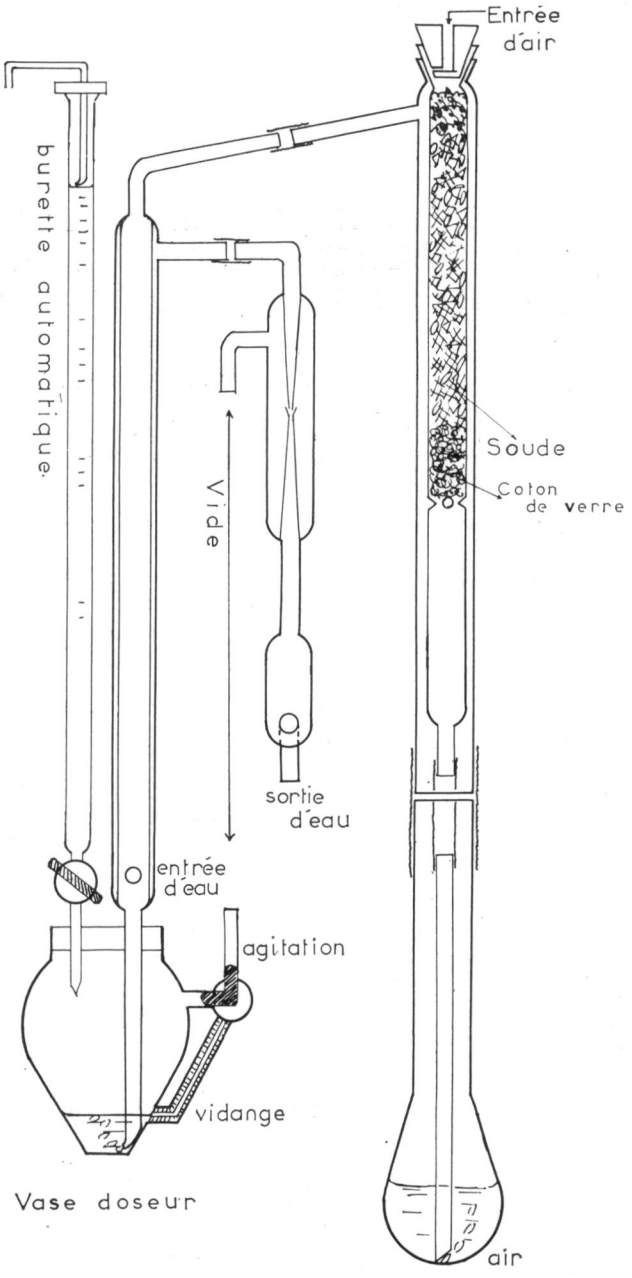
D'autre part le courant d'air, obtenu à l'aide d'une trompe à vide, permet l'agitation des liquides à neutraliser, ce qui rend le dosage en partie automatique.

Cet appareil se prête particulièrement à l'analyse en série puisque la durée maximale d'un dosage ne *doit pas dépasser* 2 minutes. Avec les temps morts de mise en route (environ 2 minutes) et de remplacement des matras successifs, il permet de réaliser facilement de 20 à 25 dosages proprement dits à l'heure.

PRINCIPE DE L'APPAREIL

Les appareils classiques de dosage de l'azote en macro ou micro-analyse, après kjeldahlisation, comportent souvent un entraînement des vapeurs ammoniacales par un courant de vapeur d'eau, qui, s'il améliore notablement la rapidité du dosage, augmente, par contre, le volume de solution à titrer et de ce fait, diminue la sensibilité du virage. Les appareils sans entraînement de vapeur, en revanche (genre Schlœsing-Aubin), allongent fortement le temps du dosage.

L'appareil présenté ici améliore à la fois le temps de distillation totale, le virage des indicateurs en fin de réaction par diminution du volume distillé, enfin, il est semi-automatique (et pourrait facilement être entièrement automatisé), l'opérateur n'ayant réellement qu'une seule opération à réaliser : l'écoulement de la burette de titrage. L'entraînement de l'ammoniac, l'agitation du liquide en titrage sont réalisés par un courant d'air créé par une trompe à vide ; celle-ci servant aussi bien à la vidange du flacon-doseur.



Appareil semi-automatique de dosage de l'AZOTE

DESCRIPTION DE L'APPAREIL

Il comporte sensiblement les mêmes organes qu'un appareil classique, modifiés pour améliorer le rendement : un ballon de réaction, une colonne rectificatrice, un réfrigérant suivi d'une trompe à vide, un ensemble de titrage que nous appellerons le « vase doseur » (voir photo).

Ballon de réaction

C'est le matras lui-même dans lequel s'est faite l'attaque par kjeldahlisation. Son volume peut varier de 30 à 100 ml, suivant les besoins ; comme nous le verrons plus loin, c'est celui de 100 ml qui présente le plus d'avantages.

Colonne de rectification

Elle comporte deux parties, l'une externe, l'autre interne, les deux se trouvant reliées par un rodage.

a) *Partie externe.*

C'est un simple tube droit en Pyrex ayant à sa partie supérieure, le rodage femelle et le tube de sortie vers le réfrigérant. Sa longueur utile est d'environ 30 cm.

b) *Partie interne.*

Elle a un diamètre d'environ 3 mm de moins que la précédente. C'est à l'intérieur de celle-ci que passera l'air extérieur, venant barboter dans le liquide du matras pour l'agiter et entraîner l'ammoniaque. Elle se trouve donc prolongée vers le bas par un tube de 8 mm de diamètre qui arrive presque au fond du matras.

Cette partie interne est remplie sur les trois quarts de sa longueur de billes de verre de 8 mm de diamètre dans le bas, de 5 mm dans sa partie haute. Elle réduit fortement le volume mort de la colonne rectificatrice d'une part, et d'autre part, elle joue le rôle de volant de chaleur, à l'intérieur de cette colonne ; celle-ci ne se refroidira que très peu entre les dosages.

[Les billes de verre peuvent être remplacées par de la soude en pastilles, maintenues par du coton de verre si l'on craignait une carbonatation des liquides par cette voie. Cette soude devra évidemment être changée de temps à autre].

Afin d'éviter toute perte de vapeur par cette voie, cette partie interne est obturée par un bouchon de caoutchouc, jouant le rôle de soupape. Il est facile de réaliser celle-ci : à l'aide d'une lame de rasoir, on sectionne, à environ 1 mm du bas, le bouchon sur presque toute sa surface, jusqu'à environ 2 mm du bord opposé à celui par lequel on a commencé à trancher. A l'aide d'un perce-bouchon, on fait alors un trou de 6-8 mm de diamètre, en laissant intacte la partie de faible épaisseur que l'on vient ainsi de détacher.

Réfrigérant

C'est un réfrigérant classique de West de 30 cm de longueur utile et de faible diamètre. Les arrivée et sortie de l'eau sont à angle droit, l'une par rapport à l'autre. La sortie d'eau se trouve branchée sur une trompe à vide qui va créer le courant d'air nécessaire à l'entraînement des vapeurs ammoniacales et à l'agitation du liquide à doser, d'autre part, l'aspiration servira à la vidange du vase-doseur : elle ne doit pas être trop violente.

Vase-doseur

Le réfrigérant aboutit par son extrémité inférieure dans le fond du flacon-doseur. Celui-ci est constitué par une boule en pyrex comportant deux tubulures latérales, l'une en haut du flacon, l'autre en bas, environ au premier tiers du flacon. Ces deux tubulures sont reliées par un robinet à

trois directions avec le vide de la trompe. On peut donc mettre le vide en communication soit avec le haut du doseur (agitation et titrage) soit avec le bas (vidange).

Enfin, le doseur est bouché avec un bouchon percé de deux trous, l'un laissant passer la sortie du réfrigérant (qui plonge dans le liquide résiduel du doseur), l'autre la pointe d'une burette à remplissage automatique de 10 ml graduée au 1/20 de ml. L'ensemble de l'appareil a environ 50 cm de haut et un empâtement de 15 cm. Il peut donc être placé sur un support ordinaire.

Remarque importante.

Toutes les jonctions qui sont en contact avec les vapeurs sont constituées de caoutchouc silicone ou de gomme pure. Nous avons, en effet, rencontré des tubes de matière plastique qui libèrent de façon continue une alcalinité dont nous n'avons pas cherché à analyser la provenance, mais qui fausse évidemment tous les résultats.

A la mise en route, il faudra vérifier qu'il n'y a aucun essai à blanc de cette sorte.

MISE EN MARCHE DE L'APPAREIL

Mode opératoire

1° *Un matras de 100 ml.*

Rempli avec 50-60 ml d'eau, est mis en place et maintenu à la fin de chaque série de dosages, ce qui permettra la mise en route, facile et rapide (1 à 2 mn) de l'appareil à chaque début de séries de dosages.

2° *Pesées — kjeldahlisation.*

Les pesées sont faites (avec une balance au 1/10 de mg) dans un papier à cigarettes et correspondront à 1 ou 2 mg d'azote. Nous verrons plus loin qu'il n'y a aucun intérêt à travailler avec de plus fortes doses. Cela représente entre 50 et 100 mg de matière sèche pour les poudres végétales (entre 500 mg et 1 g pour les terres). Elles sont placées dans des matras de 100 ml par séries de 10. On ajoute alors, à l'aide d'une spatule en verre environ 200 mg du catalyseur classique (Se = 5 g ; $SO_4Cu\ 5H_2O$ = 20 g ; SO_4K_2 = 80 g), puis 2,5 ml d'acide sulfurique 66°B et 3 ou 4 billes de Pyrex (diamètre = 3 mm) pour régulariser l'ébullition.

L'attaque est faite sur une rampe en acier inoxydable comportant des trous de 2 à 3 cm de diamètre, sur lesquels viennent se placer les fonds des matras (on évite ainsi les surchauffes locales). Ceux-ci sont maintenus en place vers le haut par une paroi verticale à encoches, dans lesquelles les cols s'intercalent.

Un simple tube en Inox, percé de trous de 3 mm, sert au chauffage des matras.

Ce chauffage est réalisé de la façon suivante : durant 5 mn on mène l'attaque à feu doux. On agite, puis on poursuit à feu très vif durant 1 heure. Nous reviendrons sur ce temps d'attaque.

3° *Préparation des matras.*

On laisse refroidir, durant 10 minutes et ajoute dans chaque matras 20-25 ml d'eau.

4° *Neutralisation.*

L'appareil ayant été mis en état d'équilibre thermique (chauffage de la partie intérieure de la colonne durant deux ou trois minutes), le doseur est mis en communication avec la trompe *par le haut* (aspiration (1) et agitation). On ajoute alors avec une cuillère en Inox environ 3 g de NaOH en pastilles dans le matras en cours de dosage. La réaction de neutralisation ne se produisant pas immédiatement, on a devant soi un très large temps pour adapter à l'appareil. Avant tout chauffage, on agitera le matras par une légère rotation pour opérer la neutralisation totale. On est averti qu'il

(1) Voir note dernière page.

y a suffisamment de soude par la précipitation du cuivre du catalyseur. Le bouchon-soupape élimine toute perte.

5° *Distillation.*

A ce moment, la circulation de l'air se trouve réalisée dans l'ensemble de l'appareil. On chauffe à pleine flamme. Il faut environ 30 s pour amener la première goutte de condensation au bas du réfrigérant, c'est-à-dire dans le doseur.

Celui-ci, par sa construction, conserve à demeure 5 à 6 ml d'eau d'un précédent dosage. Dès la première goutte, il y a virage au vert du colorant restant, il suffit de titrer par une solution ClH N/70 *au fur et à mesure* des arrivées ammoniacales. Nous reviendrons sur ce point dans l'expression des résultats, pour étudier ce qu'il y a lieu de faire, afin d'éviter toutes pertes dues à l'aspiration. En général, 30 secondes à 45 secondes à partir de l'apparition du vert, suffisent pour que la distillation d'ammoniaque soit complète, cela représente environ 10 ml de distillat. A cause de cette très faible quantité de liquide, les virages sont particulièrement nets et peuvent être appréciés à la goutte près, c'est-à-dire à moins de 1/20 de ml de ClH N/70, soit moins du 1/100 mg d'azote.

Le temps moyen de distillation a été chronométré sur une série de 20 dosages : 50 minutes au maximum, soit 2 mn 30 s. par dosage, toutes opérations comprises.

Fin d'opération.

Le dosage terminé et la lecture à la burette faite, le matras est enlevé. Le bas du flacon doseur est alors mis en communication avec le vide pour la vidange de l'excès de liquide. On remet le haut en relation avec l'aspiration pour le dosage suivant et le cycle d'opérations recommence alors. (En fin de série, on laisse en place un matras avec 50 ml d'eau).

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Nous venons de voir que la sensibilité du virage permettait l'appréciation facile du 1/100 de mg, de ce fait et pour la rapidité de toutes les opérations, l'on a intérêt à travailler sur des quantités les plus faibles possible. Il est très facile d'opérer sur des pesées de 200 à 300 mg pour des teneurs d'azote de 1 à 3 p. 100. Mais, pour notre compte, nous préférons aller à la limite et faire des pesées de l'ordre de 50 mg, de la sorte les caractéristiques à observer sont celles que nous avons signalées (200 mg de catalyseur, 2,5 ml de SO_4H_2 66°B, 1 heure d'attaque), les neutralisations, après dilution à 25 ml, n'amènent pas de réactions violentes, comme dans les méthodes habituelles, où il est souvent nécessaire de refroidir.

Ces pesées de 50 mg, qui peuvent paraître faibles pour une bonne précision, exigent dès lors un broyage énergique pour que l'échantillon soit représentatif de la moyenne.

BROYAGE DES ÉCHANTILLONS

Nous nous sommes adressés pour cette étude à des matériaux pour lesquels l'hétérogénéité est très souvent sensible :

1° De la paille de riz.
2° Des issues de meunerie.

Pour chacun d'entre eux, deux échantillons ont été réalisés, un grossier, un fin dont les caractéristiques sont les suivantes :

Refus au tamis (mm)	Riz %		Issues %	
	Grossier	Fin	Grossier	Fin
1	0	0	4,4	0
0,500	14	0	28,6	0
0,200	58	48	41,0	33
0,100	17,3	31,7	25,0	61
0,050	6,5	18,5	1,0	6
0,050	4,2	1,8	traces	

Nous noterons, en passant, que les échantillons notés « fins » passent entièrement à la maille 0,50 mm. Les résultats vont nous montrer que cette finesse est suffisante pour une très bonne précision. Chaque échantillon a fait l'objet de 10 mesures avec des pesées voisines de 50 mg.

Issues :

	Grossier		Fin	
	Pesées (mg)	% d'azote	Pesées (mg)	% d'azote
	62	2,84	60	2,55
	55,0	2,66	61,0	2,55
	49,0	2.55	58,0	2,58
	53,5	2,64	60,5	2,54
	55	2,65	66,0	2,48
	57,5	2,64	45,0	2,48
	61,0	2,53	74,0	2,54
	56,5	2,59	60,0	2,49
	58.5	2,57	57,5	2,53
	54,5	2,63	61,5	2,51
Moyennes :	56,2	2,630	60,3	2,522

Paille de riz :

	Grossier		Fin	
	Pesées (mg)	% d'azote	Pesées (mg)	% d'azote
	72	0,63	77	0,710
	73,0	0,63	92,0	0,736
	100,0	0,63	97,0	0,743
	80,0	0,66	74,0	0,743
	66,0	0,67	76,0	0,746
	62,0	0,69	87,0	0,715
	77,0	0,65	77,0	0,740
	81,0	0,63	86,0	0,740
	83,0	0,60	89,0	0,723
	87,0	0,65	86,0	0,721
Moyennes :	78,2	0,644	82,3	0,731

Nous constatons, une fois de plus, l'importance du broyage sur les moyennes de ces résultats, qui fait que celles-ci sont, pour les échantillons grossiers, tantôt

plus élevées, tantôt plus faibles que celles des échantillons fins (1). Ce n'est pas là le problème qui nous occupe, mais uniquement la dispersion des résultats en fonction du broyage.

Le dépouillement de ces résultats par le calcul statistique (méthode suivie : DEAN et DIXON) nous donne :

Riz :

	Grossier	Fin
Moyenne	0,644	0,731
Médiane	0,640	0,736
Écart-type	0,028 7	0,010 9
Écart moyen (précision d'un résultat)	0,093 6	0,034 3
Valeur vraie de la médiane (P = 0,95)	0,610 < M < 0,670	0,725 < M < 0,747
Erreur relative	*4,6* %	*1,5* %

Issues

	Grossier	Fin
Moyenne	2,630	2,522
Médiane	2,635	2,525
Écart-type	0,102	0,033
Écart moyen (précision d'un résultat)	0,032 2	0,010 4
Valeur vraie de la médiane P = 0,95	2,533 < M < 2,767	2,495 < M < 2,535
Erreur relative	*3,8* %	*1,1* %

On notera d'une part l'intérêt d'un broyage fin des échantillons (passant entièrement à la maille 0,50 mm) d'autre part, la fidélité et la précision de la méthode.

Echantillons fins	Erreur relative	Dispersion des résultats
Riz	1,5 %	0,033 %
Issues	1,1 %	0,100 %

La comparaison entre l'appareil décrit et un appareil classique, menée par deux opérateurs différents a donné les résultats suivants :

	Appareil semi-automatique	Appareil classique
Pesées (mg)	50	250
	2,00	2,02
	1,66	1,67
	1,84	1,84
	1,68	1.71
	1,75	1,77
	2,14	2,14
	1,79	1,83
	1,56	1,54
	1,80	1,81
Moyennes	1,802	1,810

(1) Ségrégation de particules plus ou moins riches.

Cette précision montre que le travail sur des pesées d'environ 50 mg est parfaitement défendable : il suffit d'une bonne balance au 1/10 de mg.

MODE DE TITRAGE

On pouvait craindre que l'aspiration assez poussée des vapeurs ammoniacales puisse créer des pertes sensibles, tout au moins dans les premières secondes. C'est ce que nous avons vérifié, en opérant sur une terre acide à 0,88 p. 1 000 d'azote :

Pesées	1 g
Catalyseur	200–250 mg
Acide	3 ml
Attaque	1 heure

*I*re *série :*

Le titrage total exigeant aux environs de 4 ml ClH N/70, nous avons mis dans le doseur, en plus du liquide restant (10-15 ml du précédent dosage), 2 ml d'acide N/70 *au préalable*. Dès que le virage se produit au fond du doseur, on maintient la solution au rose en versant ClH avec la burette. Il est bien évident qu'il ne peut y avoir de pertes dans ces conditions. Les résultats obtenus furent les suivants :

Acide au départ (ml)	Volume ClH final (ml)	°/oo de terre fine
—	—	—
2	4,30	0,86
2	4,40	0,88
2	4,40	0,88
2	4,45	0,89
2	4,40	0,88
2	4,40	0,88

Moyenne = 0,88 pour mille de terre fine.

*II*e *série :*

On opère la distillation sans ajouter d'acide durant 2 minutes, après lesquelles le titrage est réalisé :

Acide au départ (ml)	Volume ClH final (ml)	°/oo de terre fine
—	—	—
0	4,30	0,86
0	4,20	0,84
0	4,15	0,83
0	4,20	0,84
0	4,35	0,87

Moyenne = 0,85 pour mille

Sans être élevées, les pertes sont sensibles dans ce cas-là (2 à 7 p. 100).

*III*e *série* :

1 ou 2 ml d'acide étaient placés dans le doseur avant le début de la distillation, puis celle-ci était opérée durant deux minutes sans nouvelle addition d'acide. Le titrage était alors poursuivi :

Acide au départ (ml)	Volume ClH final (après 2 mn de distil.) (sans nouvel ajout) (ml)	°/oo de terre fine
—	—	—
1	4,40	0,88
1	4,40	0,88
1	4,35	0,87
2	4 40	0,88
2	4,35	0,87
2	4,40	0,88

Moyenne = 0,876 pour mille de terre fine

On voit qu'il suffit pour éliminer toutes pertes, de bloquer l'ammoniaque simplement en début de réaction. C'est là un avantage considérable, car il est *absolument inutile* d'opérer par des titrages en retour ou en présence d'acide borique qui rend les virages passablement flous (il est facile de régler le volume d'acide initial en fonction des teneurs qui sont habituelles pour un matériel déterminé).

TEMPS D'ATTAQUE

Nous avons, enfin, voulu nous rendre compte de l'importance des écarts que pouvait amener la durée de l'attaque :

1. *Terre*

Cet essai a été également fait sur la terre précédente et, bien qu'il soit difficile d'extrapoler à tous les cas rencontrés, il est parfaitement probant.

Temps d'attaque (mn)	Volume de titrage	°/oo de terre fine
—	—	—
20	4,35	0,87
	4,40	0,88
30	4,40	0,88
	4,35	0,87
40	4,40	0,88
	4,40	0,88
50	4,35	0,87
	4,40	0,88
60	4,40	0,88
	4,40	0,88

Moyenne = 0,877 pour mille de terre fine

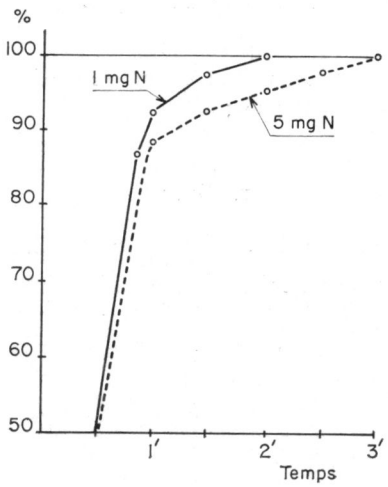
2. *Végétal* (Olivier)

Pesées en mg	Temps d'attaque	%
—	—	—
51,0	15 mn	1,68
57,0 / 57,3	30 mn	1,74
48,2 / 41,4	45 mn	1,75
44,0	1 heure	1,77
42,3	1 h 15	1,77
59,0	1 h 30	1,75
47,2	1 h 45	1,76
46,3	2 h	1,77

Dans les deux cas, terre ou végétal, on voit qu'il n'existe pas de différences significatives, entre 30 mn et 2 heures d'attaque, ce qui confirme le temps de 1 heure auquel nous nous sommes arrêtés.

Temps de distillation

Le graphique ci-joint montrera ce que l'on peut attendre de cet appareil. Les deux courbes ont été obtenues avec des moyennes de 5 résultats pour des pesées voisines de 50 mg soit environ 1 mg d'azote, et de 250 mg, soit environ 5 mg d'azote pour de la poudre de feuilles d'olivier.



En 1 minute, 90 à 95 p. 100 de l'azote sont distillés. Dans le cas où la partie intérieure de la colonne est remplie de billes de verre, il est judicieux, après cette première minute d'envoyer un ou deux jets de pissette (2 à 3 ml d'alcool à 50 %) par le bouchon-soupape pour laver le tube intérieur, qui aurait pu, lors de la neutralisation, avoir de légères remontées de liquide.

CONCLUSION

En matière de conclusion, nous préciserons les temps de manipulation nécessaires pour une série de 10 dosages depuis la pesée jusqu'aux résultats :

Pesées	10 mn
Acide 66°B et catalyseur	3 mn
Attaque sur rampe	30 mn (à 1 heure)
Dilution (25 ml eau)	2 mn
Distillation	25 mn
Calculs	5 mn
Total	75 mn soit 1 heure et quart (à 1 heure 45)

Si l'on ne tient pas compte du temps mort que représente l'attaque et durant lequel le chimiste peut préparer ses pesées ou faire ses calculs, une série de 10 dosages demanderait un travail effectif de 45 minutes environ, ce qui rend absolument caduque l'utilisation de 10 appareils pour réaliser le même travail.

DÉTAILS TECHNIQUES

Solution acide N/70 colorée

On dissout avec le minimum d'alcool 50 mg de rouge de méthyle et 75 mg de vert de bromocrésol, que l'on met dans un ballon de 5 l avec la quantité d'eau et d'acide 2 N titré (35,7 ml) pour réaliser la normalité voulue. On peut décarbonater par un vide léger de quelques minutes.

Neutralisation

Dans le cas où l'on voudrait faire porter les dosages sur des quantités plus fortes que celles que nous venons de conseiller, par exemple 200 mg pour les matières végétales, 1 g pour les terres, les quantités d'acide et de catalyseur devront être augmentées : 4-5 ml et 500 mg environ. La neutralisation devra alors être faite en deux temps : les 20 ml d'eau ajoutés et après refroidissement, à l'aide d'une cuillère en inox, on ajoute la moitié de la soude nécessaire (3,20 g environ pour 2 ml d'acide) pour la neutralisation théorique. On laisse refroidir et l'on se trouve alors ramené au cas précédent décrit.

Appareillage

La jonction matras-colonne est réalisée, à défaut de caoutchouc-silicone de cette dimension, à l'aide de tube en plastique vert (tuyau d'arrosage) que l'on a, au préalable, fait bouillir avec de la soude 10 p. 100. Diamètre extérieur : 18 mm. Pour le mettre en place, il suffit de l'élargir à l'aide d'une pince multiple, après l'avoir ramolli dans l'eau chaude.

Enfin, pour faciliter le placement et l'enlèvement des matras, on graisse légèrement les cols de temps à autre, avec une trace de graisse inerte : silicone ou autre. Comme signalé, un matras sera laissé en place avec 50 ml d'eau à la fin d'une série de dosages.

Reçu pour publication en février 1965.

SUMMARY

TECHNICAL NOTES ON A SEMI-AUTOMATIC APPARATUS FOR THE DETERMINATION OF NITROGEN (AND CERTAIN VOLATILE COMPOUNDS)

The apparatus designed especially for the determination of ammonia nitrogen (and organic nitrogen following Kjeldahl treatment) differs from conventional apparatuses by subsituting an air current to the classical use of water vapour.

This procedure has the advantage of causing very little dilution of the titrated liquid, since there is no condensation of vapour ; thus, titration is much more distinct and may be carried out with a precision of about 1/100 mg nitrogen.

The air current, produced by means of a vacuum pump, stirs the liquid to be neutralized, thus rendering the determination partly automatic.

The apparatus is particularly suitable for serial analyses, since one determination requires a maximum of two minutes; with the time needed for preparation (about two minutes) and changing the flasks of successive samples, a total of 20 to 25 determinations may easily be performed in an hour.

ZUSAMMENFASSUNG

TECHNISCHES ÜBER EINEN HALBAUTOMATISCHEN APPARAT ZUR STICKSTOFFDOSIERUNG (SOWIE EINIGER FLUCHTIGEN VERBINDUNGEN)

Der vorgeführte Apparat zur Dosierung des Ammoniakstickstoffs (und des organischen Stickstoffs nach Kjeldahlisierung) unterscheidet sich von den herkömmlichen Apparaten dadurch, dass der Wasserdampf durch Luftströmung ersetzt wird.

So wird die Verdünnung der Titrierflüssigkeit auf ein Mindestmass heruntergesetzt, da keine Wasserdampfkondensierung entsteht. Das Tritieren wird daher genauer, bis zum 1/100 mg N.

Ausserdem gestattet der Luftstrom, der durch Wakuum erzeugt wird, das Schütteln der zu neutralisierenden Flüssigkeiten, also eine halbautomatische Dosierung.

Das Gerät ist besonders für Serienuntersuchungen geeignet, da die Höchstdauer einer Dosierung 2 Minuten nicht überschreiten soll. Stellt man die verlorene Zeit für Ingangsetzung (ugf 2 Minuten) : und für Kolbenwechsel in Rechnung, so können leicht 20 bis 25 Dosierungen pro Stunde gemacht werden.

Технические заметки о полу-автоматическом аппарате для дозажей азота (и некоторых летучих соединений).

А. БУА и К. КРУЗЭ.

РЕЗЮМЕ

Этот аппарат, служащий для дозажей аммониакального азота (а также и азота органического после кьельдализации), отличается от обычных аппаратов отсутствием классического парового увлекающего потока, замененного сквозным воздушным.

Этот способ имеет то преимущество что при нем не происходит конденсации пара и риск разбавления титрируемой жидкости сведен поэтому до минимума. Благодаря этому титражи получаются более четкими и могут быть проделанны с точностью до 1/100 мгр азота.

С другой стороны, сквозной ток воздуха, полученный при помощи вакуумной помпы, заменяет действие механической мешалки для нейтрализуемых жидкостей, что частично автоматизует дозаж.

Аппарат этот особенно подходит для серийных анадизов, ибо максимальная длительность одного дозажа не превышает 2-х минут. С перерывами для запуска (приблизительно 2 минуты) и для смены колб можно легко реализовать 20-25 дозажей в час.

Ann. agron., 1965, **16** (1), 119-120.

CHRONIQUE DES LIVRES

TROCME (S.), GRAS (R.). — SOL ET FERTILISATION EN ARBORICULTURE FRUITIÈRE. Paris, J. M. Perrin 1964, 240 p.

Cet ouvrage répond, à propos de l'arboriculture fruitière, à la nécessité d'analyser l'effet d'un traitement agronomique dans ses diverses conséquences pour pouvoir comprendre et, le cas échéant, généraliser le résultat global de son action.

Les différentes parties s'ordonnent autour de cette idée directrice :

— La première traite des besoins des arbres fruitiers et de la manière dont ils sont satisfaits. Les auteurs y soulignent l'importance de la croissance, de l'extension et du bon fonctionnement du système radiculaire.

— Dans une deuxième partie sont rassemblées des données de base sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ces éléments théoriques constituent un fil directeur indispensable à une bonne compréhension des considérations techniques qui suivent.

— Les modifications des propriétés physiques, les techniques d'entretien des sols de vergers, la fertilisation en éléments majeurs et oligoéléments font alors l'objet d'une troisième partie.

— Viennent ensuite l'étude et le contrôle de la nutrition par l'examen des symptômes, du profil de sol et les différentes analyses du sol et du végétal.

— Enfin, la cinquième partie est consacrée à l'examen des conditions auxquelles doit satisfaire l'expérimentation pour fournir des conclusions valables dans la pratique.

Les éléments contenus dans ce livre s'appuient sur de nombreuses références bibliographiques et sur les travaux personnels des auteurs.

G. M.

CHAPMAN (V. J.). — COASTAL VEGETATION. Londres, Pergamon Press, 1964, 245 p.

Cet ouvrage fait une description générale de la végétation côtière en Grande-Bretagne et au Nord de l'Europe. Après un chapitre consacré aux principes écologiques de base, l'ouvrage traite des végétations de la zone littorale et sublittorale, des marais salants, des dunes, des plages et des falaises. Le livre contient de nombreux graphiques et une bibliographie abondante.

J. L.

POPOV (V. V.), ed. — LŒSS OF NORTHERN CHINA. (*translated from Russian*). Jerusalem, Israel program for scientific translations, 1964, 134 p.

Ce livre édité par V. V. POPOV et traduit en anglais par le Service israélien, comprend une série d'articles fondamentaux dédiés à l'Académicien V. A. OBRUCHEV (1863-1956) qui a passé une très grande partie de sa vie à visiter et à étudier les dépôts de lœss du nord de la Chine. Il débute d'ailleurs par un long mémoire du Maître, publié une première fois en 1954 et qui a été repris intégralement ici. La synthèse proposée est envisagée principalement sous l'angle stratigraphique avec une description détaillée des grandes formations : argile rouge à hipparion, vieux lœss rouge, lœss jaune...

Les 4 autres articles sont les suivants :

— quelques éléments sur la genèse du lœss chinois, par V. I. PAVLINOV,

— la question de l'origine du lœss du nord de la Chine, par A. S. KES,

— la genèse du lœss dans la région de Lungtung (nord-ouest de la Chine), par CHANG-TSUNG-HU,

— la formation des dépôts de lœss dans le nord de la Chine, par YANG CHIEH, et enfin, la découverte d'autruches fossiles en Chine et leur signification, par YANG CHUNG-CHIEN et SUN MENG LIN.

C'est la question de la genèse du Loess qui est abordée la plus longuement. Certes la vieille hypothèse de von Richthofen est conservée dans son ensemble, mais avec un certain nombre de développements et même de nuances que les spécialistes pourront étudier avec profit.

G. P.

MOSEMAN (A. H.), ed. — AGRICULTURAL SCIENCES FOR THE DEVELOPING NATIONS. AAAS symposium, vol. 76. Washington, American Association for the Advancement of Science 1964, 232 p.

Le thème du Symposium était le rôle de l'agriculture et de la technologie dans l'accélération des progrès économiques des nations en développement.

Les 12 chapitres de cet ouvrage exposent les problèmes et l'opportunité d'une assistance agricole technique, économique et éducatrice, et traitent des sujets suivants :

— caractéristiques des systèmes agricoles dans les nations en développement,
— recherches pour diffuser et adopter les méthodes nouvelles,
— éducation et développement des ressources humaines,
— établissement d'institutions indigènes destinées à faire progresser l'agriculture.

J. L.

KOSLOWSKI (T. T.). — WATER METABOLISM IN PLANTS. Harper and Row, New York 1964, 227 p.

Dans ce travail, l'auteur passe en revue les aspects les plus importants du métabolisme de l'eau dans les plantes. L'attention du lecteur est particulièrement attirée par le xérophytisme, l'importance de l'eau dans les cellules et les tissus, l'absorption et la translocation de l'eau, les pertes en eau, l'évapotranspiration potentielle et les conséquences d'un déficit en eau sur les processus physiologiques et la croissance. L'aspect dynamique de l'alimentation en eau des végétaux est bien mis en valeur (fig. 9 et 10 particulièrement).

Par ailleurs, l'auteur présente un certain nombre de résultats très intéressants concernant les racines (surface, résistance au passage de l'eau, greffage naturel), ainsi que le lessivage des éléments minéraux sur les feuilles par la pluie. Enfin, l'action du déficit en eau sur la texture du bois de quelques arbres est bien mis en évidence.

Au point de vue méthodologie, seuls les principes généraux ont été décrits, mais de nombreuses références bibliographiques complètent cette étude. Un certain nombre de théories parfois contradictoires sont développées et discutées. Les conclusions de l'auteur sont en accord avec les résultats des travaux français sur le même sujet.

S. P.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit être doit dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :
a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction,* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.
Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.
Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.
La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.
Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant diposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.
Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.
Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.
Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5. *soit* × 0,25.
Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.
Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.
Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. CHAMINADE, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise), France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 16-7-1965.

Dépôt légal : 3e trimestre 1965. *N° d'impression : 1682.*

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 2

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique, à l'exception des sommaires et résumés.

Ann. agron., 1965, **16** (2), 127-175.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'INFILTRATION DE L'EAU NON SATURANTE (1)

CAS D'UN SOL INITIALEMENT SEC ET D'UN ARROSAGE SANS FORMATION DE PLAN D'EAU EN SURFACE

PREMIÈRE PARTIE (2)

Par A. FEODOROFF

Laboratoire des Sols. Centre national de Recherches agronomiques, Versailles, (Seine-et-Oise)

PLAN

INTRODUCTION.

CHAPITRE PREMIER — MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

A. Les sols étudiés.

B. Réalisations des expériences d'infiltration.

CHAPITRE II. — AVANCEMENT DU FRONT D'HUMECTATION.

A. Résultats expérimentaux : la vitesse du front est constante.

B. Essais d'application de la loi de Poiseuille aux phénomènes observés.

C. Variation de la vitesse d'avancement du front avec l'intensité d'arrosage.

D. Résumé et conclusions.

CHAPITRE III. — DISTRIBUTION DE L'EAU DANS LES PROFILS.

A. Remarques préliminaires. Le processus schématique d'infiltration.

B. Confrontation du processus schématique avec l'expérience.

(1) Thèse de Docteur-Ingénieur soutenue le 23 février 1965, à la Faculté des Sciences de Paris.
(2) La deuxième partie de ce mémoire paraîtra dans le nº 3/1965 des Annales agronomiques.

C. Variation des différentes caractéristiques du profil hydrique avec l'intensité d'arrosage.

D. Résumé et conclusions.

CHAPITRE IV.(1) — RECHERCHE DE SCHÉMAS EXPLICATIFS POUR RENDRE COMPTE DE L'INFILTRATION SANS PLAN D'EAU EN SURFACE.

A. Développement de l'infiltration pour une intensité d'arrosage donnée.

B. Variation avec l'intensité d'arrosage.

C. Quelques aspects exclus du schéma général.

D. Vérification expérimentale de l'effet de pénétration « en coin ».

CHAPITRE V. — ÉTUDE DE QUELQUES VALEURS SPÉCIFIQUES.

A. L'humidité du sol calculée par le rapport I/V.

B. L'humidité minima à l'infiltration.

C. L'intensité critique d'arrosage.

D. Intensité maxima admissible (= Capacité limite d'absorption).

E. Conclusions : possibilités d'application pratique.

CHAPITRE VI. — EFFETS DE L'ÉTAT STRUCTURAL SUR L'INFILTRATION.

A. Effets sur le processus d'infiltration.

B. Conséquences pour les valeurs spécifiques.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

ANNEXES.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

---

(1) Ce chapitre et la suite paraîtront en deuxième partie, dans le numéro suivant des Annales Agronomiques.

INTRODUCTION

Dans le cycle naturel de l'eau, on distingue classiquement les stades suivants : la pluie, l'infiltration, le ruissellement et l'écoulement, la reprise par l'évaporation suivie de condensation dans l'atmosphère. Ainsi, en tombant sur le sol, la pluie se partage en deux fractions : l'une s'infiltre et l'autre ruisselle. La première reconstitue les réserves du sol, recharge les nappes, permet l'alimentation des végétaux, et échappe pour une grande part à l'évaporation. L'eau qui ruisselle est immédiatement disponible pour l'évaporation : elle entraîne l'érosion avec toutes ses conséquences néfastes, et constitue « un manque à gagner » pour le sol et la végétation. Il apparaît donc que la connaissance des modalités de l'infiltration est primordiale pour contrôler le cycle de l'eau. De plus l'extension de plus en plus grande de l'arrosage par aspersion nécessite la connaissance des conditions optimum de l'emploi de l'eau d'irrigation.

Les problèmes de l'infiltration ont retenu depuis longtemps l'attention des praticiens et des chercheurs. Il existe un assez grand nombre d'études, mais la plupart traitent du cas particulier où un plan d'eau constant est établi à la surface du sol. Elles portent en fait sur des modèles représentatifs des anciens systèmes d'irrigation, avec une lame d'eau apportée sur le terrain (rigoles, calants...). Elles présentent l'avantage de pouvoir être traitées par les méthodes de l'hydraulique et de la physique, car, au moins à la surface du sol, la charge hydrostatique et le potentiel thermodynamique sont connus. Mais ces conditions expérimentales ne reflètent qu'imparfaitement les phénomènes naturels où l'eau (pluie ou arrosage par aspersion), tombe sur le sol et pénètre en totalité. C'est à une meilleure connaissance du processus d'infiltration dans des conditions plus proches de la nature que ce travail est consacré.

Nous avons choisi de procéder à une étude expérimentale, en cherchant à reproduire aussi fidèlement que possible les comportements naturels, à l'aide de modèles simples. Dans ce but, les essais ont été effectués uniquement sur des sols initialement secs et homogènes, qui ont reçu des apports d'eau dont l'intensité était de l'ordre de grandeur de celle des pluies ou des débits d'aspersion.

Terminologie

Dans tout ce qui suit, le terme *infiltration* recouvre tous les mouvements de l'eau à l'intérieur du sol *pendant la pluie*. Les mouvements qui se produisent après la pluie seront appelés *redistribution*, suivant une terminologie tacitement admise dans les diverses publications récentes traitant d'hydrologie du sol.

CHAPITRE PREMIER

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

La méthode expérimentale consiste en une étude au laboratoire sur modèles. Le grand avantage de cette façon d'opérer est de pouvoir contrôler de nombreux facteurs, ce qui n'est pas le cas d'essais sur le terrain.

La terre séchée au laboratoire est introduite dans des tubes en verre. Ces colonnes sont soumises à un arrosage, à l'aide d'un dispositif simple. Ainsi nous avons pu fixer la nature du sol, le degré de son tassement dans les colonnes, son état structural, l'intensité et la durée de la pluie.

La transposition sur le terrain des résultats ainsi obtenus est possible dans la mesure où ces facteurs contrôlés s'écartent peu des conditions naturelles et qu'ils en couvrent une gamme importante. Dans ce but nous avons cherché à opérer sur des sols différents. Nous donnons plus loin les raisons qui ont guidé leur choix, ainsi que les modalités pratiques de la mise en œuvre des expériences.

A. Les sols étudiés

1. *Choix des sols*

Nous avons retenu une gamme de matériaux ayant des propriétés variées mais connues. Le choix a porté sur sept sols différents. Six d'entre eux correspondent à trois profils, dont ils constituent la couche de surface et le sous-sol.

Ainsi quatre échantillons proviennent des parcelles de la ferme du Centre national de Recherches agronomiques à Versailles. Nous les appellerons du nom du lieudit d'origine, à savoir « Les Closeaux » et la « Pierre-Plate ». La première parcelle est constituée de limon des plateaux, la seconde de sable de Fontainebleau, fréquemment appelé « sable à lapin » dans la région. Deux autres échantillons proviennent (1) de la Station Agricole de Grimari (Parcelle EA 1), en République Centrafricaine. Par rapport au limon de Versailles, ils présentent l'avantage de n'être pas gonflants en cours d'imbibition, tout en étant argileux : il s'agit d'un sol ferralitique dont la fraction colloïdale est essentiellement constituée de kaolinite. Enfin le septième échantillon est l'horizon B des cases lysimétriques de Versailles, qui a déjà fait l'objet de nombreuses études par ailleurs. Il présente néanmoins l'inconvénient d'avoir un comportement hydrique en place mal défini.

(1) Nous les devons à l'amabilité de M. R. MOREL, directeur de cette station, qui nous a fourni ces échantillons ainsi que tous les renseignements concernant leur comportement en place.

TABLEAU I

Caractéristiques des sols étudiés

Appellation de l'échantillon	Profondeur du prélèvement (cm)	Texture (1)	Composition granulométrique, % de terre sèche						Stabilité structurale	
			Matière organique	0 — 2 μ	2 — 20 μ	20 — 50 μ	50 — 200 μ	0,2 — 2mm		log 10 S
Closeaux 15 — 25	15 — 25	Limoneux	1,70	16,15	18,90	46,65	14,90	1,70	Faible	1,89
Closeaux 50	45 — 55	Limono-argileux	0,60	32,30	20,30	39,85	6,65	0,30	Moyenne	1,74
Grimari 0 — 15	0 — 15	Argilo-sableux								
Grimari 15 — 30	15 — 30	Argilo-sableux	2,80	31,30	7,60	10,80	38,20	9,30	Bonne	1,11
Pierre-Plate 15	10 — 20	Sableux fin organique	2,10	38,95	6,60	10,60	33,30	8,45	Bonne	1,19
			1,30	9,55	8,45	3,10	74,35	3.25	Faible	1,82
Pierre-Plate 45	40 — 50	Sableux fin non organique	0,20	7,05	2,35	1,40	88,15	0,85	Faible	2,46
Hor B cases	Sous-sol	Limono-argileux	0,60	28,70	26,40	42,40	1,50	0,30	Moyenne	1,65

(1) D'après le diagramme triangulaire inédit de R. BÉTRÉMIEUX. (*Communication personnelle*).

2. *Propriétés générales des sols étudiés*

La composition granulométrique a été déterminée par la méthode DEMOLON et BASTISSE (1934) sans décarbonatation (1).

La stabilité structurale a été évaluée par la méthode HÉNIN (1957) au moyen de l'appareil à tamiser (FEODOROFF, 1958), ce qui a permis d'obtenir l'indice S de stabilité des agrégats caractérisant la résistance à la destruction par l'eau.

L'ensemble de ces propriétés est rassemblé dans le tableau 1. On constate que les sols étudiés couvrent une gamme étendue de textures. Chaque profil est représenté par un horizon riche et un horizon pauvre en matière organique. La stabilité structurale est également assez variée. Ces sols montrent donc une grande diversité quant à leurs caractéristiques physiques fondamentales.

3. *Comportement hydrique des sols en place. Capacité au champ*

La capacité de rétention, ou capacité au champ, est généralement considérée comme une caractéristique importante du sol.

Si ce concept est exact, il doit y avoir une période de l'année où, le sol étant bien pourvu en eau et l'évaporation relativement faible, l'humidité se maintient constante. C'est ce que nous avons vérifié en employant la méthode préconisée par RODE (1960). Elle consiste à faire des déterminations périodiques de l'humidité en place et à étudier la variation de cette grandeur dans le temps.

Cette méthode a été appliquée aux trois profils étudiés. Pour réduire l'évaporation, le sol était maintenu nu. Les déterminations d'humidité se faisaient au moyen de prélèvements d'échantillons séchés ensuite à l'étuve. Pour les deux sols de Versailles, les prélèvements étaient effectués à jour fixe, une fois par semaine, durant l'automne 1962, l'hiver (sauf les périodes de gel) et le printemps 1963. A Grimari les prélèvements étaient faits tous les 5 jours, en 1961 et 1962.

Le nombre de répétitions était variable : à Versailles quatre valeurs de l'humidité pour chaque horizon considéré, à Grimari, neuf échantillons mélangés. Pour chaque date on a ainsi une humidité moyenne.

Nous avons porté ces données sur un graphique (temps en abscisse et humidité en ordonnée). On observe dans tous les cas une courbe ascendante de l'humidité pendant la réhumectation du sol, puis un palier qui se maintient pendant toute la période où la pluviométrie dépasse selon toute vraisemblance l'évaporation. Sous le climat de Grimari, ce palier correspond à la période des pluies (juin à novembre) pendant laquelle il tombe 1 500 mm ou plus. Pour ce sol nous avons ainsi deux paliers, l'un en 1961 et l'autre en 1962. Dans la région parisienne, et dans les conditions de l'année 1962 (hiver très froid et printemps très pluvieux), ce palier s'établit assez tard et correspond aux mois de mai et juin. Dans tous les cas, sa fin est très nettement marquée par une baisse de l'humidité.

Pour chacun de ces paliers, on a déterminé la valeur moyenne de l'humidité ainsi que l'erreur standard s de cette moyenne :

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma(x - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

(1) Aucun des sols ne contient de carbonates.

où x : humidité moyenne à chaque date ;

$\bar{x}$: humidité moyenne du palier ;

n : nombre de dates de prélèvement.

On constate (tabl. 2) que l'erreur standard est faible dans tous les cas. L'humidité moyenne $\bar{x}$ est donc définie avec une précision plus que satisfaisante pour des déterminations en plein champ.

Si on exprime cette humidité moyenne en p. 100 de volume, et qu'on rapporte ce nouveau pourcentage à la porosité totale du sol en place (calculée d'après la densité apparente mesurée sur le terrain), on constate que le taux de saturation se situe entre 52,6 et 70,0 suivant les horizons, Le sol n'est donc que partiellement rempli.

TABLEAU 2

Comportement hydrique des sols en place

Sol	Capacité au champ				Densité apparente	Porosité en % de volume	Capacité au champ en % de volume	Taux de saturation %
	Nombre de déterminations (n)	Nombre de répétitions à chaque détermination	Humidité moyenne en % de poids ($\bar{x}$)	Erreur s				
Closeaux 15 — 25	12	4	19,60	0,18	1,41	47,8	27,6	57,8
Closeaux 50	26	4	22,35	0,13	1,45	46,3	32,4	70,0
Pierre-Plate 15 .	14	4	16,55	0,30	1,46	46,0	24,2	52,6
Pierre-Plate 45 .	17	4	16,20	0,19	1,50	44,5	24,3	54,
Grimari 0 — 15.	38	1 (9)	21,06	0,23	1,32	51,0	27,8	54,5
Grimari 15 — 30.	38	1 (9)	20,52	0,16	1,52	44,7	31,2	69,8
Hor B cases....	1	4	26,60 (1)		1,50	45,3	39,9 (1)	88,2 (1)

(1) Valeur peu sûre, car les prélèvements n'ont pas pû être répétés dans le temps.

Cette série de résultats conduit donc à penser que, pour chacun des horizons considérés, on se trouve bien en présence d'une valeur caractéristique de l'humidité, qui n'est autre, par définition, que la *capacité de rétention en place*, ou *capacité au champ* (1).

Cette capacité au champ a des valeurs comprises entre 16 et 24 p. 100 suivant les sols étudiés. On a donc à cet égard une gamme de matériaux de comportements assez différents.

(1) Cette terminologie, bien que traditionnelle, n'est pas très heureuse. Cette « capacité » n'est qu'une partie de la capacité volumétrique du sol. Nous conserverons néanmoins dans ce texte le terme de « capacité au champ » car il est consacré par l'usage.

B. Réalisation des expériences d'infiltration

Chaque essai a consisté à réaliser un arrosage d'intensité constante et connue sur une colonne de sol sec. On a ainsi un modèle simple de l'infiltration de la pluie.

1° *Préparation des colonnes de sol*

Les colonnes ont été constituées en versant dans des tubes transparents le sol préalablement séché à l'air et tamisé à 2 mm. Pour des essais particuliers, relatifs à l'effet de l'état structural, nous avons utilisé des agrégats calibrés (« mottes ») de dimensions comprises entre 5 et 10 mm.

Pour maintenir la terre et pour permettre à l'air de s'échapper par le bas au cours de l'arrosage, les tubes étaient fermés à leur partie inférieure par une gaze en nylon. Cette dernière était recouverte d'une rondelle de papier-filtre destinée à empêcher les fines particules de glisser entre les mailles de la gaze.

La terre était introduite dans le tube en 20 à 40 prises. En tapotant pendant le remplissage, on s'arrangeait pour obtenir la densité apparente fixée d'avance. L'homogénéité du remplissage était contrôlée visuellement : les colonnes présentant un litage étaient reconstituées jusqu'à l'obtention d'un résultat satisfaisant.

Pour les sols limoneux et argileux nous avons retenu une densité apparente de 1,2. Pour les deux sols sableux, nous avons adopté une densité apparente plus élevée (1,25), pour nous rapprocher des conditions de terrain : le degré de tassement est surtout important pour des matériaux où, selon toute vraisemblance, l'eau circule et est retenue essentiellement dans les vides situés entre des particules inertes.

Nous avons employé pour la plupart de nos essais des tubes en verre, d'un diamètre intérieur de 3,2 cm et d'une longueur de 30 cm. Quelquefois, les tubes étaient plus longs mais de même diamètre, et rarement d'un diamètre de 5,6 cm. Il n'a pas été noté d'influence de la dimension des tubes sur les comportements observés.

2° *Réalisation de l'arrosage*

Étant donné la faible section des tubes, il n'a pas semblé nécessaire de réaliser une pluie artificielle. Nous avons estimé qu'un apport goutte à goutte était suffisant. Les essais ont en effet montré que ce système est très satisfaisant tout au long de l'expérience, à l'exception des tout premiers instants où les gouttes qui tombent au centre de la colonne se propagent non seulement verticalement, mais latéralement, jusqu'à ce que toute la section soit humectée.

L'effet mécanique des gouttes sur le sol était peu sensible, car elles avaient une hauteur de chute de quelques centimètres seulement. Pour certaines intensités et certains échantillons, la surface était protégée par une rondelle de papier-filtre.

Le goutte à goutte était obtenu avec un tube capillaire. Une des extrémités de ce tube plongeait (fig. 1) dans un erlenmeyer dans lequel un plan d'eau était maintenu constant grâce à un vase de Mariotte. Avec ce dispositif, la variation du niveau du plan d'eau n'a pas dépassé 1 mm. Ainsi le débit d'un capillaire restait inchangé pendant toute la durée de l'essai.

Pour faire varier l'intensité d'un essai à l'autre, nous avons soit modifié la charge hydrostatique h (dénivellation entre le plan d'eau et l'extrémité du tube), soit pris des tubes capillaires de caractéristiques (diamètre intérieur, longueur) différentes.

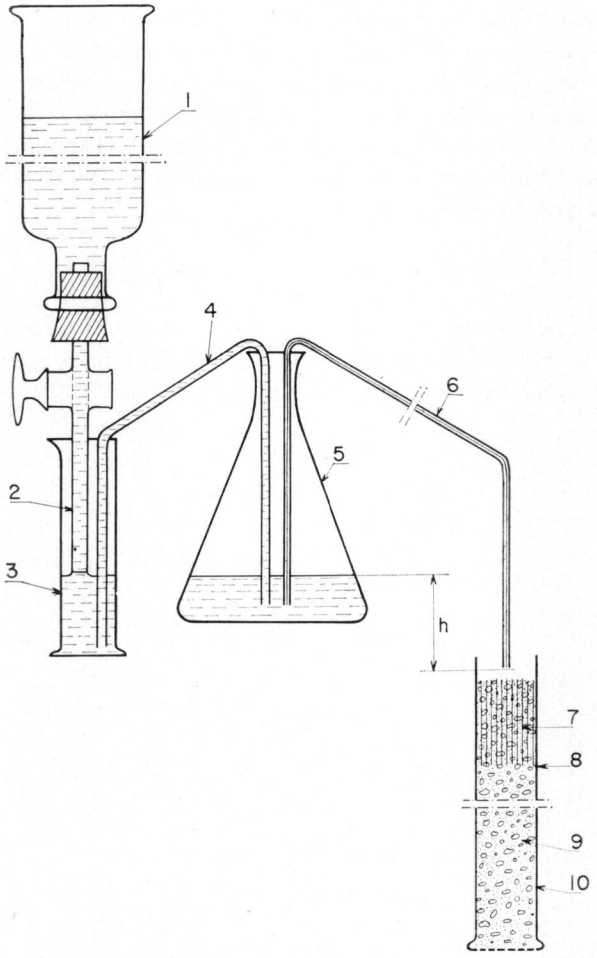


FIG. 1. — *Dispositif d'essai.*

1 : vase de Mariotte ; 2 : tube ;
3 : récipient étroit ; 4 : syphon ;
5 : erlenmeyer avec plan d'eau constant ;
6 : capillaire d'arrosage ;
7 : sol humecté ; 8 : front ; 9 : sol sec ;
10 : tube gradué ; h : charge.

Pour certains essais de longue durée, l'abaissement de la température ambiante pendant la nuit a peut-être entraîné une baisse de l'intensité. Par la suite, nous avons évité cet inconvénient en maintenant l'erlenmyer et le tube capillaire dans un bain à température constante

Ce système a permis de réaliser des intensités d'arrosage comprises entre 0,556

et 0,014 mm/mn (la plus faible correspond à la chute d'une goutte d'eau toutes les 5 minutes environ).

Pour les intensités plus fortes, nous avons légèrement modifié le dispositif, en remplaçant le tube capillaire en verre par une seringue hypodermique piquée dans un tuyau de caoutchouc maintenu plein d'eau par l'erlenmeyer en charge.

Pour un essai donné, l'intensité était préalablement réglée par tâtonnements. L'intensité réelle moyenne de l'essai (mm/mn) était calculée à partir de l'apport d'eau total (obtenu en pesant la colonne de terre avant et après arrosage), de la durée totale de l'arrosage et de la section de la colonne de terre

Avec les essais de longue durée, nous avons limité l'évaporation à partir de la surface du sol en recouvrant le sommet du tube d'un capuchon en polyéthylène percé d'un trou laissant passer le capillaire.

3° *Observations du front d'humectation*

Le terme de *front* désigne la ligne séparant la terre humectée, qui prend une couleur foncée, de la terre encore sèche, plus claire. En fait, ce qui apparaît à l'œil, ce n'est pas la totalité du front, mais son contour extérieur (1). Au moment du prélè-

TABLEAU 3

Horizontalité du front
Progression sur 4 génératrices

Temps minutes	Profondeur mm			
	I	II	III	IV
5	12	10	14	17
15	42	44	45	45
25	62	65	62	62
35	80	80	80	80
45	97	99	97	97
55	114	114	115	115
65	129	130	134	132
75	147	150	150	149
85	162	169	168	164
95	177	183	184	180
105	193	200	200	196
115	210	214	216	215
125	227	230	231	
135	242	247	248	
140	250	254	254	

Les lectures sur les génératrices III et IV sont décalées d'une minute par rapport aux 2 autres.

vement du profil hydrique, nous avons pu constater que le front réel est une surface légèrement irrégulière, peu différente d'un plan horizontal, sans qu'on y observe de

(1) Avec le dispositif d'arrosage employé, le front n'apparaît sur la paroi du tube que lorsque les premières gouttes ont permis l'humectation de toute la surface de la colonne de terre.

zones avancées ou de zones en retrait de façon systématique. Dans ces conditions, le contour extérieur est une donnée valable pour situer la position de la totalité du front. Son repérage s'effectuait à l'aide de graduations centimétriques, portées sur la paroi du tube, et d'une échelle millimétrique mobile.

Nous avons vérifié que pendant l'infiltration la surface du front est sensiblement horizontale et se déplace parallèlement à elle-même. Pour un des sols étudiés, les observations ont été effectuées sur quatre génératrices, correspondant à la trace sur le tube de deux plans axiaux orthogonaux. Les résultats, consignés dans le tableau 3, montrent qu'à chaque instant, la position du front est sensiblement la même, quelle que soit la génératrice. De même les vitesses constantes calculées à partir de la 35e minute sont extrêmement voisines :

Génératrice	Vitesse mm/mn
I	1,622
II	1,640
III	1,675
IV	1,666
Moyenne	1,651

Ceci nous a autorisé à mesurer la position du front sur une seule génératrice.

L'espacement des lectures dans le temps était tel qu'on obtienne au moins un point expérimental par centimètre parcouru. Suivant les intensités et les sols, les intervalles étaient donc très différents (entre dix minutes et plus d'une heure), mais généralement constants pour un essai donné.

Menées pendant la journée de façon régulière, ces observations étaient interrompues la nuit et reprises le lendemain pour les essais à faible intensité d'arrosage qui ont duré parfois plusieurs jours.

4° *Détermination des profils hydriques*

Lorsque le front était parvenu à quelques centimètres du bas de la colonne, on arrêtait l'arrosage et on déterminait la teneur en eau couche par couche.

Des précautions étaient prises pour limiter la redistribution de l'eau vers le sol sec, qui restait toujours dans le fond de la colonne. A cet effet, le tube était couché, pesé, puis on prélevait rapidement en commençant par la terre sèche. Un prélèvement était systématiquement effectué sous le front : la terre sèche se détachait facilement de la terre humide et donc cohérente. A partir de ce moment, l'eau ne pouvait plus progresser. Moyennant ces précautions et la rapidité d'exécution des manipulations, l'avancement du front après arrosage n'a jamais dépassé une longueur de 0,5 cm, faible en regard de la profondeur totale humectée, toujours supérieure à 15 cm.

La couche caractérisant le front était prélevée sur une épaisseur de 0,5 cm et les autres couches sur 1 cm. L'ensemble de l'opération n'excédait pas 30 mn ; les risques de perte par évaporation étaient donc négligeables [1]. L'humidité de chaque prise était déterminée après séchage à l'étuve à 105°.

[1] Un plan d'eau libre évapore 3 à 4 mm par jour dans les conditions de notre laboratoire.

5° *Variabilité des résultats*

L'intensité d'arrosage n'étant exactement connue qu'*a posteriori*, il était très difficile de répéter les essais avec la même pluie. Par conséquent les expériences ont été effectuées en simple.

Nous avons cependant cherché à tester la variabilité de certaines données expérimentales. Dans ce but quatre colonnes du même sol ont été arrosées avec des intensités aussi voisines que possible, mais néanmoins distinctes. Pour chacune on a relevé trois données « y » (la vitesse du front, l'humidité du front, l'humidité moyenne de la zone intermédiaire) qui, comme nous le verrons plus loin, croissent avec l'intensité I. Nous avons ensuite cherché à distinguer, dans la variabilité de y ce qui est propre à cette donnée et donc indépendant de l'effet de I.

On peut admettre que dans ce faible intervalle de variation de I, les courbes $y = f(I)$ sont assimilables à des droites. Il a alors été possible de calculer, pour chacune de ces trois données, la régression linéaire entre y et I, puis la variance résiduelle, ou variance propre à la variable dépendante. Les résultats de ce calcul, conduit suivant la méthode indiquée par VESSEREAU (1960, p. 442), permettent d'apprécier le coefficient de variation (rapport de l'écart-type à la valeur moyenne) de la variable dépendante y [1].

Ces essais ont été effectués avec le sous-sol de Grimari (15 — 30) dont le profil hydrique comporte une zone intermédiaire à humidité relativement constante. Les résultats ci-dessous ne s'appliquent rigoureusement qu'au sol et à l'intensité d'arrosage considérés. Ils permettent cependant de fixer un ordre de grandeur.

Variable indépendante	Variables dépendantes		
Intensité d'arrosage (mm/mn)	Vitesse du front (mm/mn)	Humidité du front (%)	Humidité moyenne de la zone intermédiaire (%)
0,694	1,64	28,8	38,0
0,720	1,60	29,7	36,4
0,725	1,67	27,8	38,4
0,754	1,66	29,5	39,0
Écart-type résiduel.....	0,001 2	0,895	1,50
Coefficient de variation %	1,8	3,3	3,2

On constate que les données expérimentales sont sujettes à une certaine variabilité, due notamment à l'impossibilité de constituer deux colonnes identiques.

Dans ces conditions, des différences de l'ordre de 7 à 8 p. 100 (en valeur relative) entre deux valeurs quelconques d'une même donnée seront considérées comme non significatives.

(1) Nous avons bénéficié à ce propos des conseils de M. ARNOUX, chef de service de Biométrie du C.N.R.A., et tenons à l'en remercier.

CHAPITRE II

AVANCEMENT DU FRONT D'HUMECTATION

Cette donnée est la plus directement accessible : en effet on peut étudier l'avancement du front pendant que le processus expérimental d'infiltration se déroule.

Nous examinerons d'abord les résultats expérimentaux obtenus avec nos essais : ils montrent en effet l'existence d'un comportement tout à fait général. Ensuite nous tâcherons de voir si ce comportement s'harmonise avec les théories classiques de la capillarité. Enfin nous dégagerons le rôle d'un des facteurs : l'intensité de l'arrosage.

A. Résultats expérimentaux

Pour chaque essai, les profondeurs successives (z) du front sont portées en ordonnées sur un graphique, le temps étant figuré en abscisse. Cette opération a été effectuée pour les sept sols étudiés, chacun ayant reçu plusieurs arrosages, généralement 4 à 5. Tous ces résultats, soit au total 38 courbes d'infiltration, se trouvent sur les figures 2 à 9. Des courbes analogues ont été obtenues également avec des essais complémentaires.

L'observation des courbes met en évidence le fait expérimental suivant : pendant le processus d'infiltration, il y a une relation linéaire entre la profondeur du front et le temps. *Le front avance donc à vitesse constante.*

Cette vitesse constante en cours d'infiltration a été observée avec des essais où le front a atteint une grande profondeur (67 cm pour Grimari 15 — 30), ainsi que pour des profondeurs moindres mais avec des essais ayant duré plus d'un jour (Closeaux 15 — 25, Closeaux 50, Grimari 15 — 30, Pierre-Plate 15 et 45). Dans aucun cas (sauf peut-être Grimari 0-15 avec une intensité de 0,014 mm/mn [1] il n'y a de doute sur la constance de la vitesse de progression.

Ce phénomène n'intervient pas immédiatement au début de l'expérience : pendant quelque temps le front avance rapidement avec une vitesse décroissante jusqu'à ce qu'il atteigne en un temps t_i une certaine profondeur z_i. Cette profondeur ne semble pas avoir une valeur constante pour un sol donné ; il apparaît même qu'elle est plus faible pour les intensités d'arrosage les plus élevées. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point. Pour l'instant, nous pouvons tenir pour acquis qu'à partir d'une certaine profondeur z_i la vitesse d'avancement du front est constante.

[1] Encore que dans ce cas les variations soient peut-être dues aux changements de température, donc d'intensité d'arrosage.

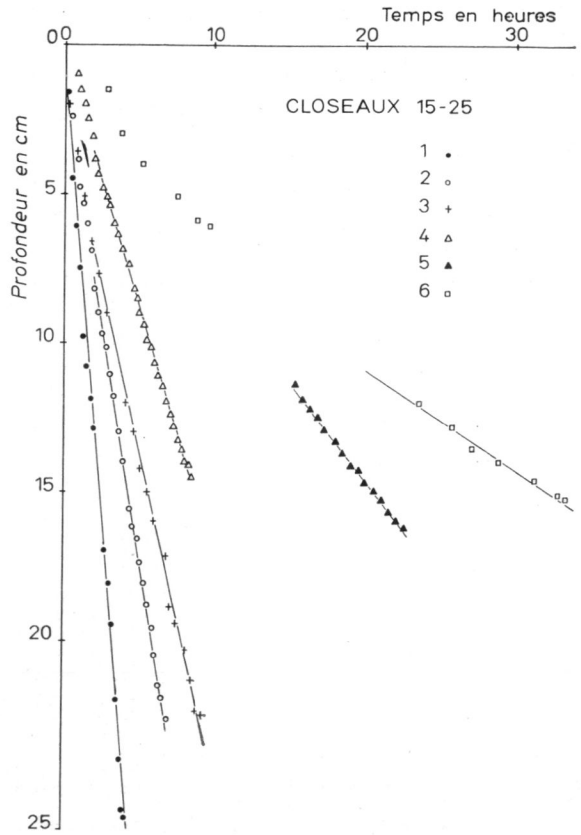


FIG. 2. — *Avancement du front. Closeaux 15 — 25.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,355 2 : 0,184 3 : 0,123
4 : 0,078 5 : 0,029 6 : 0,017

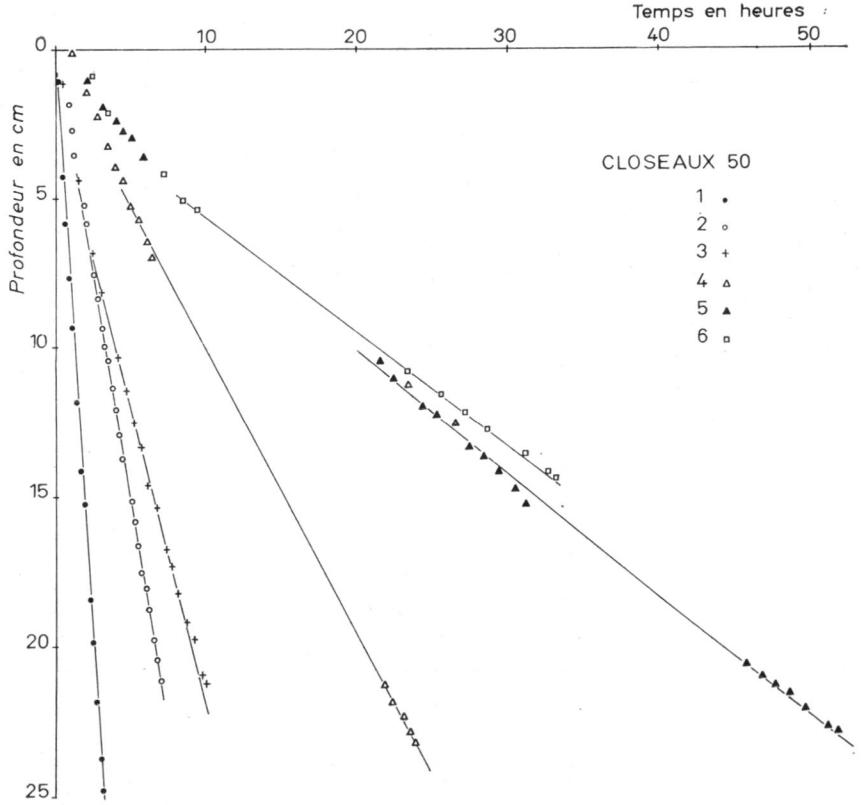


FIG. 3. — *Avancement du front. Closeaux 50.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,556 2 : 0,196 3 : 0,123
4 : 0,052 5 : 0,021 6 : 0,018

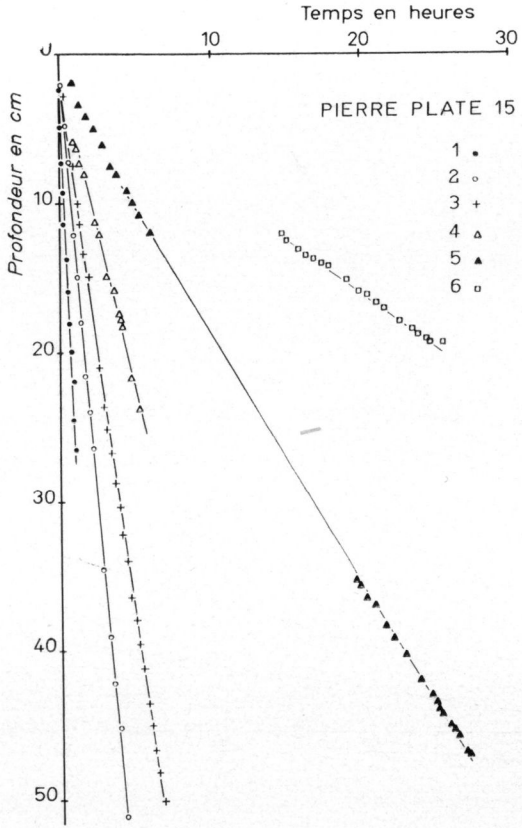


FIG. 4. — *Avancement du front. Pierre-Plate 15.*
Intensités mm/mn : 1 : 1,800 2 : 0,750 3 : 0,420
4 : 0,205 5 : 0,077 6 : 0,027

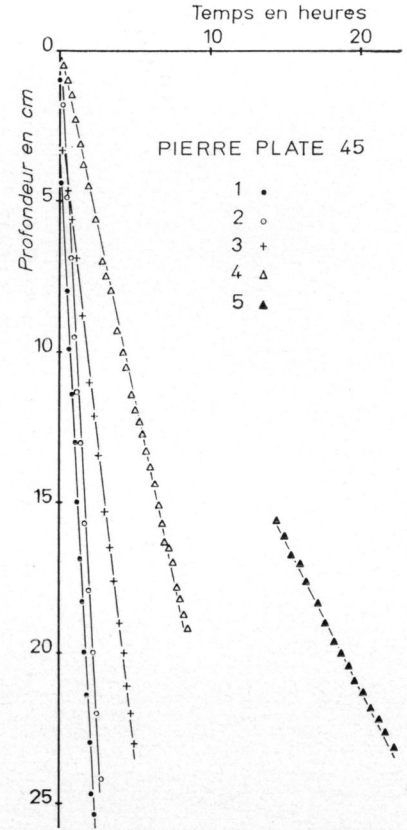


FIG. 5. — *Avancement du front. Pierre-Plate 45.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,506 2 : 0,410 3 : 0,195
4 : 0,084 5 : 0,035

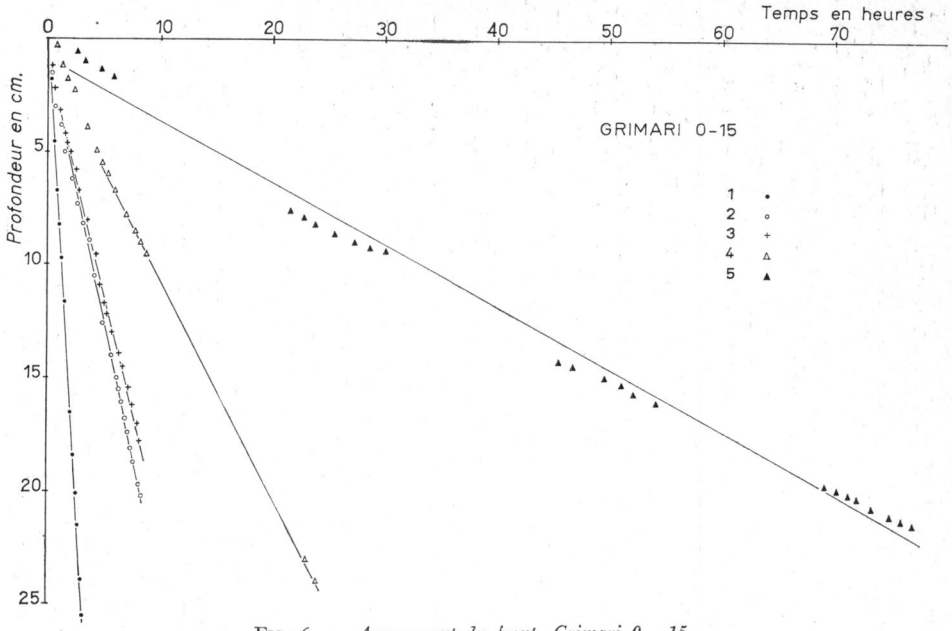


FIG. 6. — *Avancement du front. Grimari 0—15.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,520 2 : 0,140 3 : 0,125
4 : 0,054 5 : 0,014

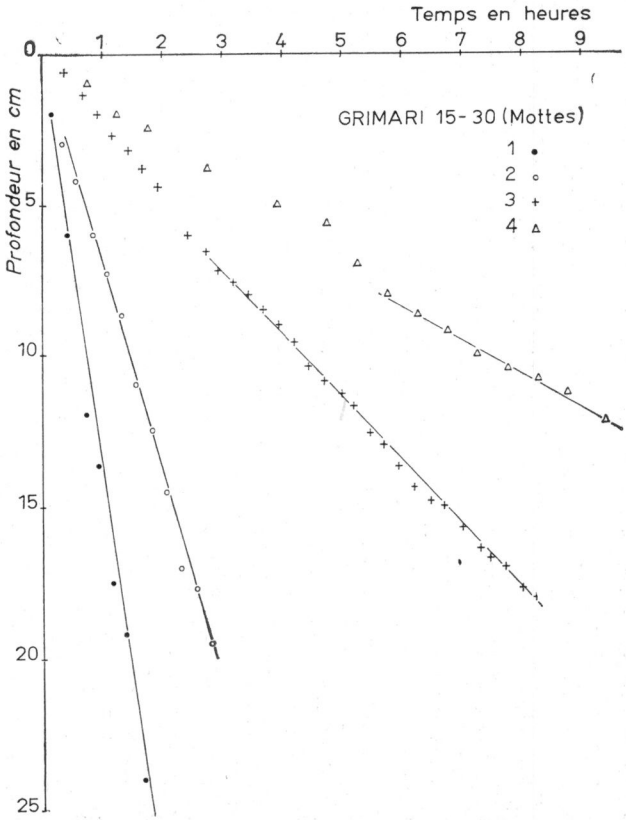


FIG. 8. — *Avancement du front Grimari 15 — 30 (mottes).*
Intensités mm/mn : 1 : 0,643 2 : 0,286 3 : 0,082
4 : 0,045

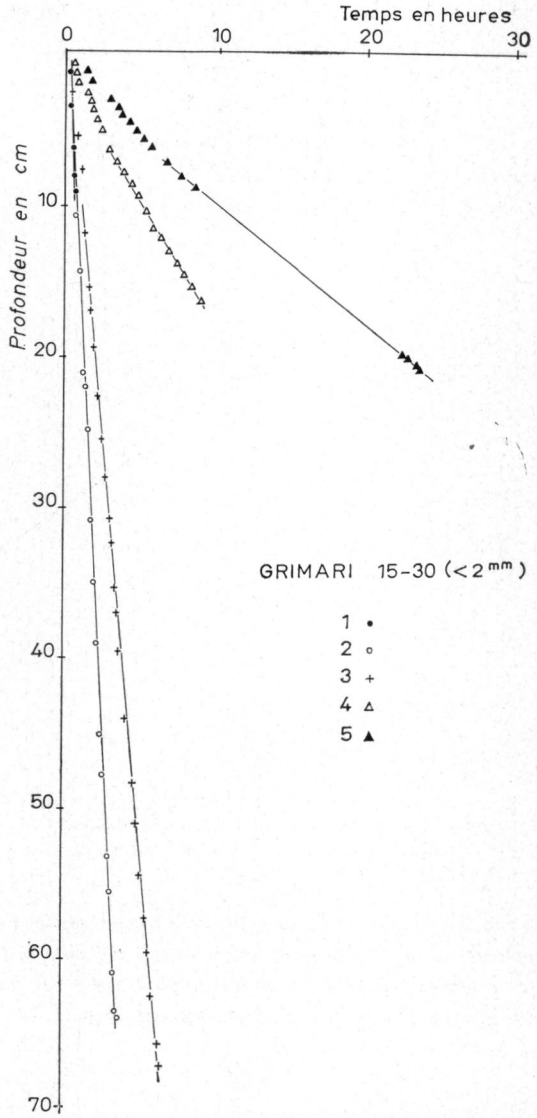


FIG. 7. — *Avancement du front. Grimari 15 — 20 < 2 mm.*
Intensités mm/mn : 1 : 1,810 2 : 1,673 3 : 0,784
4 : 0,112 5 : 0,049

Ce comportement a déjà été pressenti par YOUNGS (1960), bien que pour cet auteur le début de l'infiltration affecte une allure très différente de nos propres résultats. Par contre, les résultats des expériences récentes de RUBIN, STEINHARDT et REINIGER (1964) concordent avec nos observations. Comme par ailleurs, nos essais ont été réalisés avec des sols et des intensités variés, il est très raisonnable de penser que le comportement observé a une portée tout à fait générale. On peut le résumer ainsi :

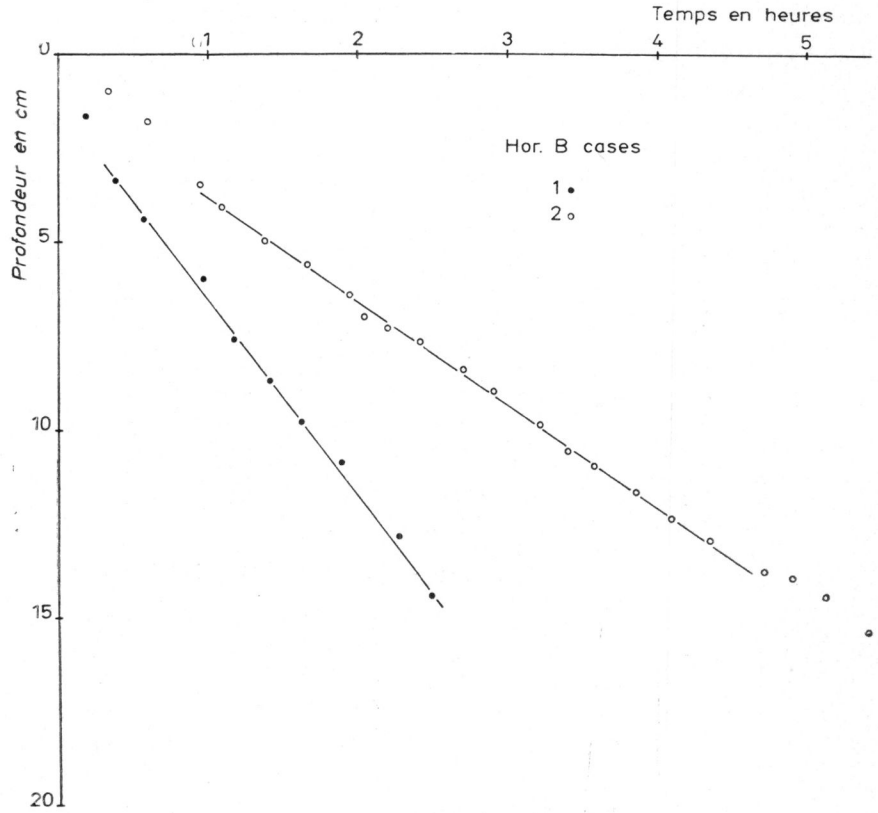


FIG. 9. — *Avancement du front. Hor. B cases.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,337 2 : 0,156.

Lorsqu'une colonne de sol sec et homogène reçoit une pluie d'intensité constante, le front visible d'humectation progresse avec une vitesse constante, à l'exception du début de l'essai où les vitesses sont plus élevées mais décroissantes en fonction du temps.

Ce résultat peut être exprimé par l'équation suivante :

$$z = z_i + v\ (t - t_i)\ ;$$

où z : profondeur du front en mm ;

z_i : profondeur à partir de laquelle la progression est constante ;
v : vitesse constante du front en mm/mn ;
t : temps (mn) depuis le début de l'expérience
t_i : temps (mn) à partir duquel la progression du front est constante.

Cette expression s'applique lorsque $t > t_i$. Le stade initial du phénomène ($t < t_i$) a une allure parabolique.

Les paramètres z_i et t_i varient avec les sols et les intensités d'arrosage. Pour fixer un ordre de grandeur, indiquons que z_i est compris, suivant les cas, entre 0 et 90 mm. Pour chacune des expériences ce paramètre a une valeur faible en regard

de la profondeur totale humectée pendant les essais. De même t_i, généralement compris entre 0 et 500 mn, n'affecte qu'une faible partie de la durée totale de l'infiltration. Donc le stade initial n'a qu'une faible extension relative dans le temps et dans l'espace, et très rapidement c'est le processus à vitesse constante qui gouverne la pénétration de l'eau.

Nous allons voir maintenant comment ce phénomène se présente sous l'angle des lois classiques de la capillarité et des applications qui en ont été déduites pour les sols.

B. Essais d'application de la loi de Poiseuille aux phénomènes observés

On peut être tenté d'assimiler la porosité du sol à un réseau de tubes capillaires. Il devient alors logique de chercher à appliquer la loi de Poiseuille aux mouvements de l'eau. Cette démarche a été plus ou moins délibérément accomplie par les nombreux auteurs (entre autres KEEN, 1931) qui ont étudié l'infiltration avec un plan d'eau à la surface, Ces auteurs sont partis soit de la loi fondamentale, soit des équations de Darcy et de « diffusion » de l'eau dans le sol. Récemment RUBIN et STEINHARDT (1963) ont tenté d'appliquer l'équation de « diffusion » à l'infiltration de l'eau apportée par pluie.

Nous allons pour notre part examiner dans quelle mesure la loi fondamentale de Poiseuille peut s'appliquer au cas qui nous intéresse.

Rappelons cette loi bien connue :

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta z} (P_0 - P_1)$$

où Q = débit ou flux ;
r = rayon du capillaire ;
η = viscosité du liquide ;
z = longueur de la colonne d'eau ;
$P_0 - P_1$ = différence de pression entre deux plans, normaux à la colonne, distants de la longueur z.

Si on considère, avec BOUASSE (1924), la vitesse d'ascension dans un tube capillaire plongeant verticalement dans un récipient contenant un plan d'eau maintenu constant, il vient

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r^2}{8\eta z} (P_0 - P_1)$$

où z est la distance entre le ménisque du capillaire et le plan d'eau libre ;
P_0 la pression capillaire donnée par la loi de Laplace ;
P_1 le poids de la colonne d'eau, par unité de section.
Comme :

$$P_0 = \frac{2 A \cos \alpha}{r}$$

A : tension superficielle du liquide ;
α : angle de raccordement solide-liquide ;

r : rayon du capillaire,

et $P_1 = \rho z$;

ρ : poids spécifique du liquide

il vient

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r^2}{8\eta}\left(\frac{2A\cos\alpha}{rz} - \rho\right) \tag{1}$$

La vitesse d'ascension capillaire s'annulle donc pour

$$\frac{2A\cos\alpha}{r\rho} = z_m$$

ce qui permet de retrouver la loi de Jurin.

Si nous assimilons cette hauteur maxima z_m d'ascension capillaire au potentiel capillaire ψ de l'eau pour le rayon r considéré, on peut poser

$$\psi = \frac{2A\cos\alpha}{r\rho} \tag{2}$$

et en portant (2) en (1) il vient :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r^2\rho}{8\eta}\left(\frac{\psi}{z} - 1\right) \tag{3}$$

Si on considère maintenant non plus une remontée capillaire mais une descente capillaire, la pression de la colonne d'eau P_1 s'ajoute à la pression capillaire P_0 ce qui donne :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r^2\rho}{8\eta}\left(\frac{\psi}{z} + 1\right) \tag{4}$$

Pour un tube capillaire on connaît r. ρ et η sont déterminés par la nature du liquide et la température. ψ est constant avec un tube, un liquide et une température donnés.

L'équation (4) exprime donc le fait que, toutes choses étant égales par ailleurs, la vitesse de descente de l'eau dans un tube capillaire décroît avec le chemin parcouru, tendant asymptotiquement vers une vitesse constante. Cette équation ne peut donc pas décrire le phénomène d'infiltration dans le sol où la vitesse du front est *constante* quel que soit le chemin parcouru, à l'exception des quelques premiers centimètres.

Il en est de même des différentes formules théoriques (dérivées plus ou moins directement de la loi de Poiseuille) ou empiriques proposées pour décrire l'infiltration de l'eau dans le sol avec une charge constante en surface.

En effet, pour la plupart des auteurs (dont KEEN, 1931 ; KOSTIAKOV, VAN DUIN, 1955 ; PHILIP, 1957 *a*), lorsque l'eau pénètre (soit *per ascensum*, soit *per descensum*, soit horizontalement) dans un sol sec à travers une couche saturée, la position du front (ou, ce qui est équivalent, la quantité d'eau infiltrée) est reliée au temps par une équation comprenant un terme où t est élevé à une puissance voisine de 0,5 et éventuellement un terme en t. La vitesse du front est donc décroissante. Le terme linéaire en t, quand il existe, comme dans la formule de PHILIP, n'est prédominant qu'après un temps très long, de l'ordre de 30 h. En outre ce dernier auteur, en par-

tant de considérations théoriques, est arrivé à la conclusion que la vitesse du front doit être rigoureusement constante lorsque la durée de l'infiltration tend vers l'infini (PHILIP, 1957 *b*). Ceci se rapprocherait de nos résultats avec cette réserve que pour nous la vitesse devient constante très rapidement.

Néanmoins l'équation (4) serait applicable à l'infiltration sans plan d'eau si on pouvait considérer que la vitesse est proche de sa valeur asymptotique, donc le terme ψ/z négligeable, d'où $\psi/z + 1$ pratiquement constant. Cette condition n'est réalisable que pour ψ petit par rapport à z. Dans nos essais, z (distance du front à la surface du sol) est compris entre 0 et 60 cm. Prenons pour ψ la valeur de 15 cm et faisons varier z de 10 à 50 cm.

z cm	$\psi/z + 1$
10	2,50
20	1,75
30	1,50
40	1,37
50	1,30

Admettons que pour $10 < z < 50$ cm, le terme $\psi/z + 1$ soit pratiquement constant et égal à 1,5, et calculons la vitesse correspondante par l'équation (4). Il faut d'abord connaître le rayon du capillaire pour lequel ψ est 15 cm. En considérant de l'eau à 20°, une mouillabilité parfaite ($\cos \alpha = 1$), une tension superficielle de $A = 75$ dyne/cm, cela donne $r = 0{,}01$ cm.

En portant ces valeurs en (4) (avec en CGS $\rho = 981$ dyne/cm^3 et $\eta = 0{,}01$ poise) on trouve une vitesse de descente capillaire de 1,84 cm/sec. ou 1 100 mm/mn. Cette vitesse est considérablement plus grande que celle observée dans nos essais en régime stable : les plus grandes valeurs expérimentales sont de 3 à 4 mm/mn.

Naturellement les vitesses calculées par la formule de Poiseuille sont d'autant plus faibles que r est petit. Mais avec r petit, ψ est grand par rapport à z et le terme $\psi/z + 1$ ne peut plus être considéré comme constant.

Donc appliquée telle quelle, la formule de Poiseuille ne permet pas de décrire *quantitativement* l'infiltration sans plan d'eau en surface.

Par contre, elle peut (équation 1 avec ρ précédé de +) renseigner *qualitativement* sur les variations de l'infiltration lorsqu'on modifie la tension superficielle du liquide (A) ou la mouillabilité du solide ($\cos \alpha$). Une étude récente de PELISHEK et *al.* (1962) le confirme.

Nos essais donnent la même indication. Les deux échantillons sableux (Pierre-Plate) de granulométrie très voisine (tabl. 1), organique en surface, non organique dans le sous-sol, ont été arrosés avec des intensités presque identiques. La vitesse d'avancement du front est notablement plus élevée dans le sous-sol non organique, certainement plus mouillable, et donc ayant un $\cos \alpha$ plus grand, que le sol de surface organique.

	Intensité d'arrosage (mm/mn)	Vitesse d'avancement du front (mm/mn)
Sol organique	0,42	1,237
Sous-sol non organique	0,41	1,468

Plusieurs raisons peuvent faire que la loi de Poiseuille ne s'applique pas quantitativement au phénomène étudié. En premier lieu, nous allons en étudier une qui tient à la nature des expériences et aux conséquences que cela comporte pour la formulation de l'équation (4).

Dans le cas de l'expérience de BOUASSE le plan de référence, à partir duquel on mesure la longueur z de la colonne d'eau, est parfaitement défini : c'est le niveau du liquide dans le cristallisoir. Dans notre cas, il n'y a rien de tel. A aucun moment il ne se forme de lame d'eau à la surface du sol, et par conséquent il peut sembler arbitraire de prendre cette surface comme référence. Nous allons donc reprendre les calculs en introduisant une nouvelle façon de voir. En effet, imaginons que ce plan est un certain niveau de la colonne de terre, suffisamment pourvu en eau, qui se déplace *per descensum* à la même vitesse que le front. Ce niveau serait en quelque sorte une « source mobile » qui alimenterait le front en eau. Dans ces conditions la variable z de l'équation (4) deviendrait une constante.

Considérons ψ très grand par rapport à z : l'équation (4) peut se simplifier ainsi :

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r^2 \rho}{8\eta} \frac{\psi}{z}$$

En explicitant ψ il vient

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r\mathrm{A} \cos \alpha}{4\eta z} \tag{5}$$

Connaissant la vitesse d'infiltration donnée par l'expérience, cette formule permettrait de calculer le rayon r des pores laissant passer l'eau. Fixons un ordre de grandeur. Prenons en CGS à 20° :

$\frac{dz}{dt}$ = 0,002 cm/s. (soit 1,2 mm/mn, valeur possible avec nos essais) ;
z = 1 cm ;
A = 75 dyne/cm ;
η = 0,01 poise ;
cos α = 1.

On trouve $r \# 1.10^{-6}$ cm, donc $\psi \# 1{,}5.10^{-5}$ cm, ce qui correspond à un pF supérieur à 5.

Si on se fixe des conditions moins favorables, à savoir par exemple $z = 10$ cm et cos $\alpha = 0{,}1$, on trouve encore un rayon de pores très faible (1.10^{-4} cm) et un pF correspondant supérieur à 2.

Or, pour des valeurs expérimentales de dz/dt voisines de 1,2 mm/mn, le pF (mesuré en drainage et donc surévalué) correspondant à l'humidité du front ne dépasse pas 2 :

Sol	Vitesse du front mm/mn	Humidité (%)	*p*F
Grimari 15 — 30 (mottes).....	1,145	24,0	2,0
Pierre-Plate 15	1,237	18,5	1,5
Pierre-Plate 45	1,468	14,2	1,8

Donc, même avec cet aménagement, la loi de Poiseuille ne permet pas de fixer un ordre de grandeur raisonnable pour le phénomène étudié.

La non validité de cette loi pour décrire l'infiltration de l'eau non saturante, sans plan d'eau en surface, dans une colonne de sol sec, n'est pas faite pour surprendre. En effet avec un sol on est loin du cas simple décrit par Poiseuille :

1°) pendant l'infiltration tous les vides du sol ne sont pas remplis, alors que la section du tube capillaire de POISEUILLE est pleine d'eau ;

2°) l'assimilation de la porosité du sol à un réseau de capillaires, même anastomosés, n'est qu'une approximation très grossière. Une série d'observations montre que les pores du sol ressemblent plutôt à des chapelets de cavités, de formes et de dimensions très variées, reliés entre eux dans toutes les directions.

3°) Les pores du sol ne constituent pas un système rigide : en cours d'infiltration ils se déforment par l'imbibition-gonflement des colloïdes, ou leur dispersion. Ce dernier phénomène peut conduire à des micro-colluvionnements, parfaitement visibles à l'aide de prises de vue cinématographiques rapprochées (MOREL, 1962).

4°) La progression de l'eau dans un tube capillaire est continue, alors que dans le sol elle procède par bonds, comme l'a vu récemment VLADYCHENSKY (1962) à l'aide du cinéma également.

On est donc bien loin d'un comportement capillaire simple. La complexité des facteurs mis en cause explique d'ailleurs le grand nombre des études et des formules, théoriques ou empiriques, pour décrire l'infiltration sous charge. Quant au phénomène étudié ici, nous allons tenter plus loin [1] de donner une explication qualitative qui rende compte des résultats expérimentaux.

C. Variations de la vitesse d'avancement du front avec l'intensité d'arrosage

Le deuxième résultat qui apparaît à l'observation des courbes d'infiltration est que, pour un sol donné, *la vitesse d'avancement du front varie avec l'intensité d'arrosage.* Plus l'intensité est élevée, plus la vitesse du front est grande. L'existence d'une telle variation a été notée par J. T. MARSHALL et G. B. STIRK (1949), ainsi que par RUBIN et *al.* (1964). Nous essaierons ici de la préciser, en indiquant au préalable la méthode d'appréciation de la vitesse du front.

1. *Mesure de la vitesse du front et de l'intensité d'arrosage*

L'intensité I (mm/mn) est obtenue en divisant l'apport d'eau par la durée de l'arrosage.

La vitesse V (mm/mn) a été appréciée, suivant les cas, de deux façons différentes.

La plupart du temps la branche linéaire de la courbe z, t, a été tracée directement sur des graphiques à plus grande échelle que ceux présentés ici. La vitesse V est alors mesurée sur le graphique. Dans certains cas, cette façon d'opérer était rendue difficile soit par la dispersion des points, soit par l'intervalle de temps séparant deux groupes de points observés (cas des essais de plusieurs jours). Alors nous avons calculé la pente de la droite de régression de z (profondeur du front) en t. L'intervalle des points intervenant dans le calcul était apprécié sur le graphique.

[1] Cf. chap. IV.

Les deux méthodes donnent des résultats pratiquement identiques (tabl. 4). Nous avons donc généralement utilisé la méthode graphique, sauf dans les rares cas où la disposition des points la rendait aléatoire.

TABLEAU 4

Appréciation de la vitesse du front

Sol	Intensité d'arrosage (mm/mn)	Vitesse d'avancement du front mm/mn		Erreur relative p. 100
		calculée sur le graphique	calculée par la régression	
Closeaux 15 — 25	0,123	0,370	0,363	1,9
Pierre-Plate 45	0,195	0,692	0,702	1,4
Pierre-Plate 45	0,410	1,450	1,468	1,2
Grimari 0 — 15	0,020	0,069	0,071	2,9
Grimari 0 — 15	0,125	0,337	0,338	ε
Grimari 0 — 15	0,140	0,379	0,378	ε
Grimari 15 — 30 (mottes) .	0,643	2,600	2,367	0,4

2. *Résultats expérimentaux*

Pour chaque sol, nous avons porté sur un graphique en abscisses les valeurs de I et en ordonnées les valeurs de V (fig. 10 et 11). Pour la facilité de l'exposé les points expérimentaux portent des numéros de 1 à 6 dans les sens des I croissants. L'examen de ces graphiques fait ressortir les résultats suivants :

— pour les faibles intensités on trouve 2 ou parfois 3 points pratiquement alignés sur une droite passant par l'origine : il y a *proportionnalité* entre V et I ;

— au-dessus d'une certaine valeur de I, les vitesses croissent également, mais *moins que proportionnellement* à l'intensité.

La relation moins que proportionnelle apparaît également dans les résultats expérimentaux de RUBIN (1964). On a ainsi des raisons de penser qu'elle est tout à fait générale au-dessus d'un certain seuil d'intensité. Nous avons donc cherché à établir une relation empirique entre V et I, et à l'ajuster sur nos données.

3. *Recherche d'une formule reliant V et I*

Étant donné l'allure des courbes expérimentales, il était commode d'utiliser une formule du type :

$$V = V_l\ (1 - e^{-\mu I}) \qquad (6)$$

avec V = Vitesse d'avancement du front mm/mn ;

V_l = Vitesse limite mm/mn ;

I = Intensité d'arrosage mm/mn ;

μ = Coefficient dont l'équation de dimension est L^{-1} T. Il est donc l'inverse d'une vitesse, et assimilable à une impédance.

Cette fonction s'annule pour I = O.

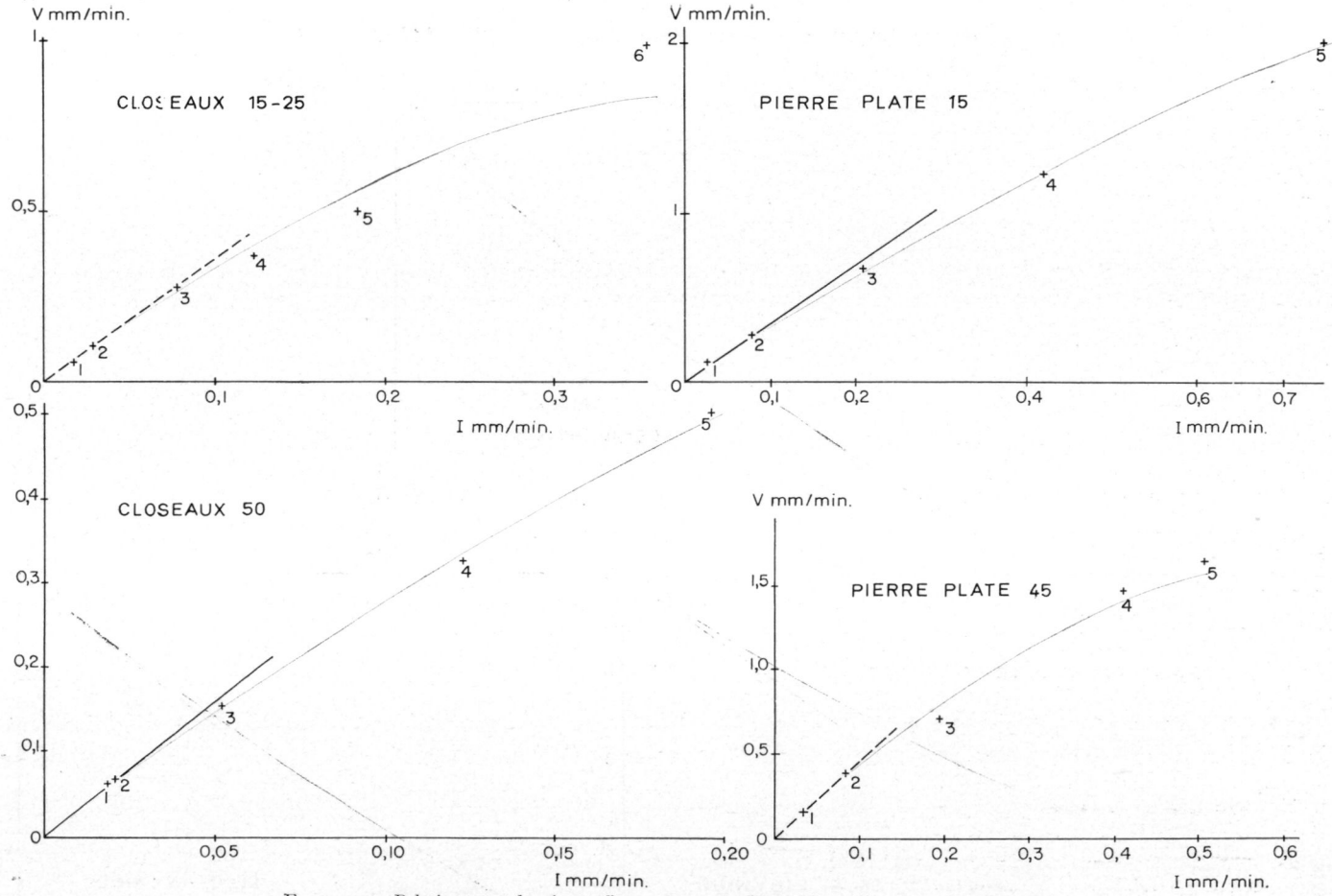


FIG. 10. — *Relation entre la vitesse d'avancement du front (V) et l'intensité d'arrosage (I).*

Droites en trait plein : tangente à l'origine (calculée).
Droites en tireté : appréciées sur le graphique. Pas de calcul de la tangente.

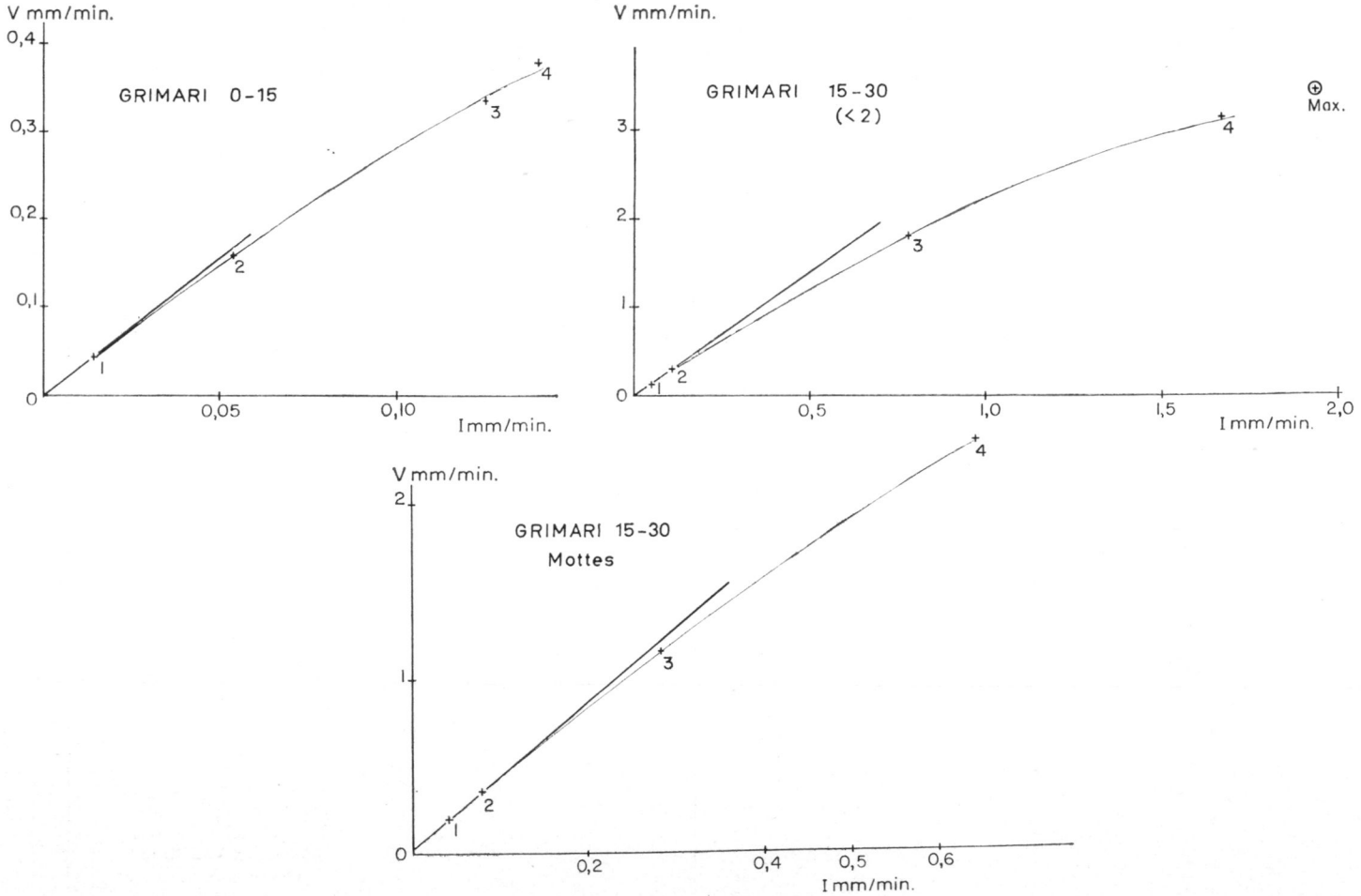


FIG. 11. — *Relation entre la vitesse d'avancement du front (V) et l'intensité d'arrosage (I).*
Droites en trait plein : tangente à l'origine (calculée).

Lorsque : $I \to \infty, \quad V \to V_l$

La tangente a pour pente :

$$dV/dI = \mu V_l \, e^{-\mu I}.$$

Elle a donc une valeur finie μV_l pour $I = O$

Cette expression n'est pas logiquement applicable à toute la gamme du phénomène, car la vitesse de pénétration maxima n'apparaîtrait que pour une intensité infinie. Or il est raisonnable de penser qu'elle apparaît pour une intensité peut-être difficile à apprécier, mais certainement finie. En dépit de cet inconvénient nous avons choisi d'utiliser cette équation car elle est d'un emploi relativement commode, et qu'elle représente assez fidèlement, ainsi qu'on va le voir, les résultats expérimentaux dans le domaine étudié.

a) *Calcul des paramètres de l'équation* (6).

Comme les différentes valeurs de la variable I ne sont pas en progression arithmétique, l'équation ne peut être résolue simplement, Pour calculer les paramètres μ et V_l nous avons donc procédé par approximations successives, à partir d'un couple de points expérimentaux, généralement les plus éloignés de l'origine. Pour chaque couple, nous avons ainsi obtenu une valeur unique de μ (les modalités du calcul sont données dans l'annexe I) et deux valeurs de V_l, extrêmement voisines, dont nous avons retenu la moyenne.

Valeurs de V_l

Point de rang n	5,627	5,105 5	3,425 8	2,417 9	1,466 5
Point de rang $n - 1$	5,607	5,102 9	3,426 7	2,398 2	1,465 9
Moyenne	5,617	5,104 2	3,426 2	2,408 0	1,466 2

TABLEAU 5

Paramètres de l'équation
$V = V_l (1 - e^{-\mu I})$

Sol	Rang des points	μ (mn/mm)	V_l (mm/mn)	μV_l	Points alignés sur l'origine	
					Rang	Rapport V/I
Closeaux 50	4 et 5	1,20	2,41	2,89	1	3,39
Closeaux 50	3 et 5	2,17	1,47	3,18	2	3,20
Closeaux 50	3 et 4	3,00	1,07	3,22		
Grimari 0 — 15..	2 et 4	2,12	1,47	3,12	1	3,21
Grimari 15 — 30..	3 et 4	0,49	5,62	2,75	1 — 2	2,80 — 2,71
Grimari 15 — 30.. (mottes)	3 et 4	0,11	38,8	4,22	1 — 2	4,25 — 4,27
Pierre-Plate 15 ...	4 et 5	0,66	5,10	3,37	1 — 2	4,37 — 3,61
Pierre-Plate 15 ...	3 et 4	1,07	3,43	3,67		
Hor. B	1 et 2	1,38	2,33	3,21		

Les calculs ont été effectués avec six sols pour lesquels les courbes (V, I) montrent une variation régulière. Deux échantillons n'ont donc pas été retenus : Closeaux 15-25 et Pierre-Plate 45.

Les valeurs des paramètres μ et V_l sont portées dans le tableau 5.

Pour deux des sols, nous avons calculé μ et V_l sur plusieurs couples de points (notés dans le tableau par leur rang) de façon à contrôler la validité de l'ajustement dans l'ensemble du domaine expérimental étudié.

On a fait figurer également le produit μV_l qui est, rappelons-le, la pente de la tangente à l'origine de la fonction $V = f(I)$. En regard de cette donnée se trouvent les rapports V/I des points expérimentaux voisins de l'origine ; ce rapport définit la pente de la droite passant par l'origine et le point considéré.

b) *Résultats et discussions.*

Pour un sol donné, les valeurs de μ, calculées sur des points de plus en plus éloignés de l'origine, tendent à décroître. Or, la courbe théorique est d'autant moins aplatie sur l'axe des abscisses que μ est petit. Cela semblerait indiquer que les accroissements de V sont relativement plus importants pour les I élevés que pour les I petits. Cependant il se trouve que les V_l calculés sont, à l'inverse de μ, décroissants avec I. Il y a là un effet de compensation, qui donne d'ailleurs un résultat très remarquable, à savoir la constance du produit μV_l pour un sol donné. En effet la tangente à l'origine (μV_l) calculée avec des points extrêmes de la courbe passe par les points expérimentaux les plus proches de l'origine. Cette convergence est particulièrement frappante pour les sols où la valeur calculée avec les points de rang 3 à 5 est pratiquement confondue avec la droite passant par l'origine et les deux points expérimentaux de rang 1 et 2. C'est le cas pour Closeaux 50, Grimari 15-30 (terre fine et mottes). Pour Grimari 0-15, seul le point 1 est situé pratiquement sur la tangente à l'origine. Pour Pierre-Plate 15, la tangente à l'origine passe par le point de rang 2, alors que le point 1 est situé au-dessus.

Nous conclurons que l'équation empirique proposée décrit d'une manière satisfaisante la relation entre V et I, avec toutefois une tendance probable à sous-estimer la croissance de V pour les intensités relativement élevées. Nous verrons plus loin (chap. V) les applications qu'on peut tirer de cette équation.

Quant aux valeurs de μ et V_l prises séparément, et si on les considère comme des paramètres caractéristiques du système, on constate qu'elles permettent un classement des sols qui n'est pas illogique. Les valeurs les plus élevées de μ (et corrélativement les plus faibles de V_l) se trouvent pour le sous-sol argilo-limoneux des Closeaux et pour le sol argilo-sableux organique de Grimari : ces deux sols ont la courbe $V = f(I)$ la plus aplatie sur l' axe des abscisses, c'est-à-dire qu'ils manifestent la plus grande tendance à devenir saturés (cf. chap. V) lorsque les débits d'arrosage sont élevés. Ce comportement est logique pour le sous-sol moyennement stable, mais assez inattendu pour le sol de Grimari qui est stable : il faut voir là peut-être l'effet de la forte teneur en matière organique de ce sol, entraînant une mouillabilité réduite [1]. Ensuite vient le sol sableux de surface avec un μ moyen de l'ordre de 0,85. Enfin le μ le plus faible, 0,49, est obtenu avec le sous-sol argilo-sableux stable de Grimari.

[1] On sait en outre de ce sol qu'il a une érodibilité moyenne pour les conditions africaines, et donc forte pour l'Europe, à savoir 5 T/ha/an environ (Communication personnelle de A. Combeau).

Nous reviendrons sur le sol en mottes dans le chapitre VI regroupant l'ensemble des informations relatives à l'influence de l'état structural.

D. Résumé et conclusions

Les principaux points acquis au long de ce chapitre peuvent être résumés ainsi :

Lorsqu'un arrosage d'intensité constante est apporté à un sol sec, le front visible d'humectation progresse à vitesse constante. Le régime stable ne s'établit qu'à l'issue d'un stade initial où la vitesse du front est décroissante. Le stade initial n'affecte qu'une faible profondeur d'humectation.

L'existence de ce régime stable est un fait nouveau. Elle pose un problème quant à la nature du phénomène. Si on essaie d'appliquer les théories classiques de la capillarité, et notamment la loi de Poiseuille, on aboutit à la conclusion que l'infiltration de l'eau dans le sol est un phénomène trop complexe pour être régi par cette loi simple. En effet, le désaccord est grand entre l'application de la loi et les faits observés.

Dans un autre ordre d'idées, les essais révèlent que la vitesse d'avancement du front varie avec l'intensité de la pluie. Une formule empirique simple a permis de relier ces deux grandeurs d'une façon satisfaisante.

Dans les chapitres suivants, nous verrons ce que ces comportements impliquent quant à la répartition de l'eau dans le sol pendant l'arrosage.

CHAPITRE III

DISTRIBUTION DE L'EAU DANS LES PROFILS

A. Remarques préliminaires. Le processus schématique d'infiltration

Le régime d'infiltration stable, caractérisé par une vitesse constante du front, impliquerait le processus schématique suivant, partiellement prévu par YOUNGS (1960) : pendant un premier stade les gouttes de pluie qui tombent sur le sol sec contribuent à amener la couche superficielle à une certaine humidité. Puis, au fur et à mesure que l'arrosage se prolonge, il se constitue une « zone à fort gradient d'humidité » surmontant le front. Au cours de ce stade, la vitesse de progression du front, d'abord rapide, va en décroissant, car une quantité d'eau de plus en plus élevée est retenue dans les couches successives.

A l'issue de ce premier stade, la zone à fort gradient se déplace en profondeur par *translation*. L'eau apportée ultérieurement vient alimenter une zone à *humidité constante* qui s'allonge. On se trouve ainsi dans les conditions d'un régime stable :

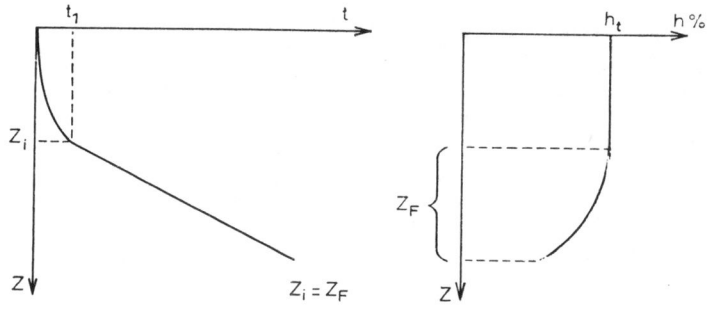


FIG. 12. — *Avancement du front et profil hydrique.*
Processus schématique d'après YOUNGS.
$Z_i = Z_f$.

le débit apporté par la pluie est véhiculé par le sol avec une vitesse constante.

Ce processus suppose que la profondeur de la zone à fort gradient (z_f) soit égale à la profondeur z_i à partir de laquelle la vitesse du front est constante (fig. 12).

Dans le but de confronter l'expérience avec cette façon de prévoir le phénomène, nous avons procédé pour chaque essai d'infiltration à la détermination du

profil hydrique. Dans chacun d'entre eux (fig. 13 à 20) on peut distinguer, de bas en haut, quatre zones :

— *le front d'humectation*, zone théoriquement réduite à un plan, pratiquement de très faible épaisseur. C'est la donnée expérimentale la mieux définie dans un profil hydrique ;

— *la zone à fort gradient d'humidité*, surmontant le front, équivalant à la « zone d'humectation » de BODMAM et COLMAN (1943). Si elle apparaît nettement dans tous les profils, son extension vers le haut est parfois difficile à définir, notamment quand il y a un changement graduel de l'humidité vers

— *une zone intermédiaire*, qui correspondrait à la zone d'humidité constante avec la profondeur ;

— *la zone superficielle* surmontant la précédente, et ayant une profondeur de 2 à 3 cm.

Rappelons que pour chacun des sols étudiés, nous avons plusieurs profils hydriques correspondant à des intensités d'arrosage différentes. Avec l'ensemble des résultats obtenus nous allons donc successivement examiner :

1° dans quelle mesure le processus schématique de l'infiltration est confirmé par l'expérience ;

2° l'influence particulière de l'intensité d'arrosage sur la distribution de l'eau dans le profil, en distinguant les différentes parties de celui-ci.

B. Confrontation du processus schématique avec l'expérience

Nous examinerons successivement l'allure de la *zone intermédiaire*, puis la correspondance entre les grandeurs z_i et z_f définies plus haut, et enfin l'existence du phénomène de translation.

1° *La zone intermédiaire des profils hydriques*

L'examen des profils expérimentaux (fig. 13 à 20) montre qu'on peut regrouper la plupart d'entre eux en quatre classes, correspondant aux profils hydriques types représentés sur la figure 21.

Le type I comporte une *humidité constante* dans la zone intermédiaire. Dans nos essais les profils suivants (1) se rapprochent de ce type : Grimari 0 — 15 (0,125 — 0,52), Grimari 15 — 30 (1,673), Grimari 15 — 30 *mottes* (0,082), Pierre-Plate 15 (1,80), Pierre-Plate 45 (0,084 — 0,41 — 0,506).

Ce type de profil hydrique est loin d'être le plus fréquent dans nos essais. De plus, on ne le rencontre qu'avec les sols sableux et les sols argileux de structure stable.

Il est difficile de le rattacher à une intensité de pluie. En effet avec les sols sableux il semble qu'il apparaisse avec les intensités élevées, mais la zone à humidité constante est alors très peu développée : pour Pierre-Plate 45 (0,506) elle n'affecte que 6 cm de profondeur alors que la tranche humectée est de 24 cm. Il en est de même pour les sols argileux stables : la zone à humidité constante ne concerne

(1) Les nombres entre parenthèses correspondent à l'intensité de l'arrosage en mm/mn.

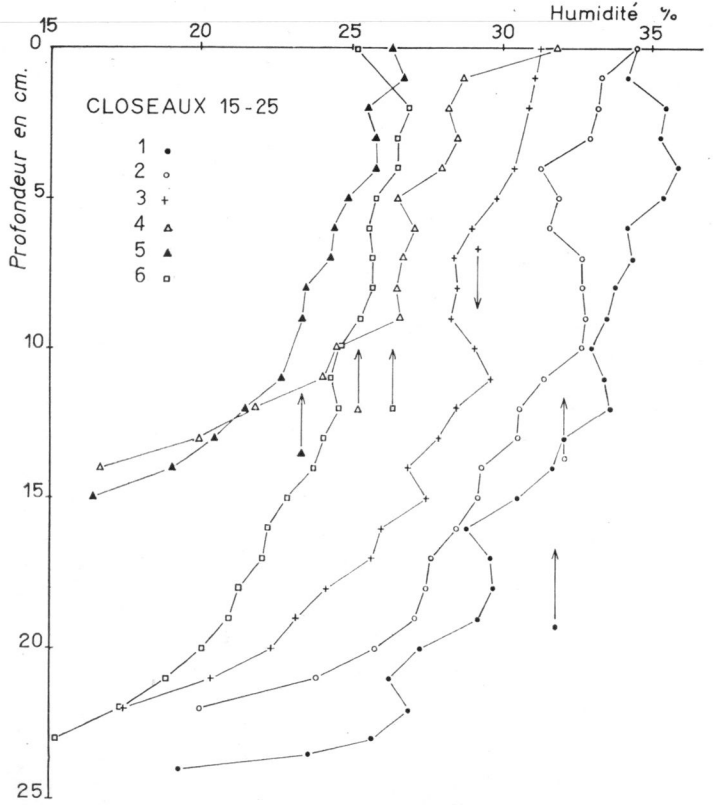


FIG. 13. — *Profils hydriques Closeaux 15 — 25.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,355 2 : 0,184 3 : 0,123
4 : 0,078 5 : 0,029 6 : 0,017

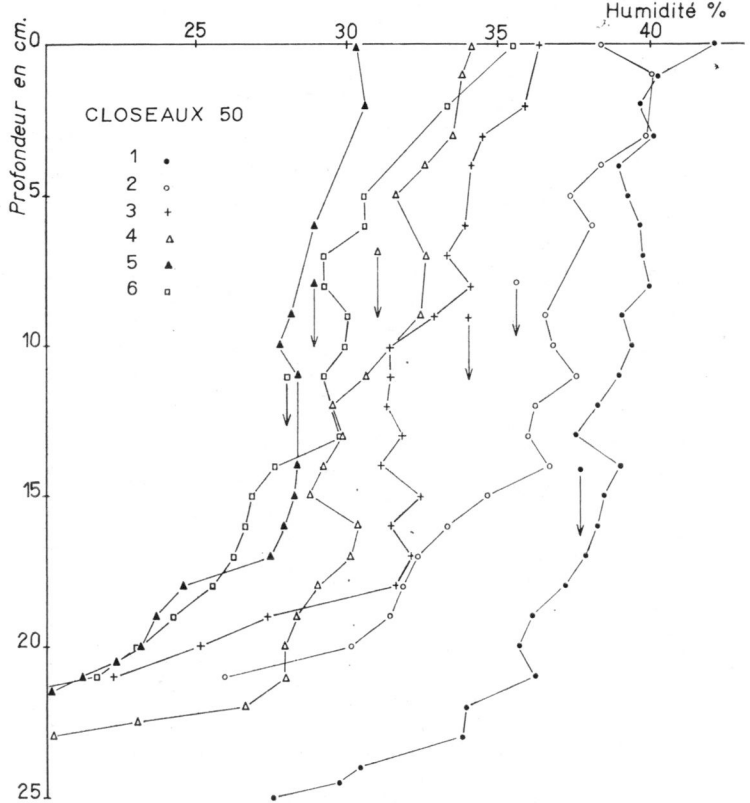


FIG. 14. — *Profils hydriques. Closeaux 50.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,556 2 : 0,196 3 : 0,123
4 : 0,052 5 : 0,021 36 : 0,018 9

La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport I/V (cf. chap. V).

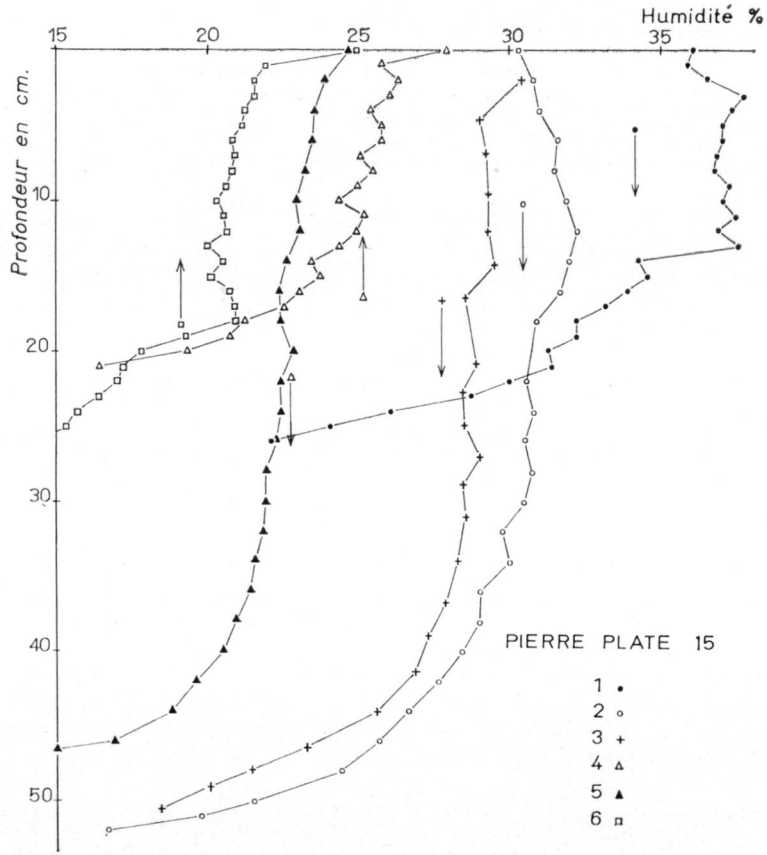


FIG. 15. — *Profils hydriques Pierre-Plate 15.*
Intensités mm/mn : 1 : 1,800 2 : 0,750 3 : 0,420
4 : 0,205 5 : 0,077 6 : 0,027

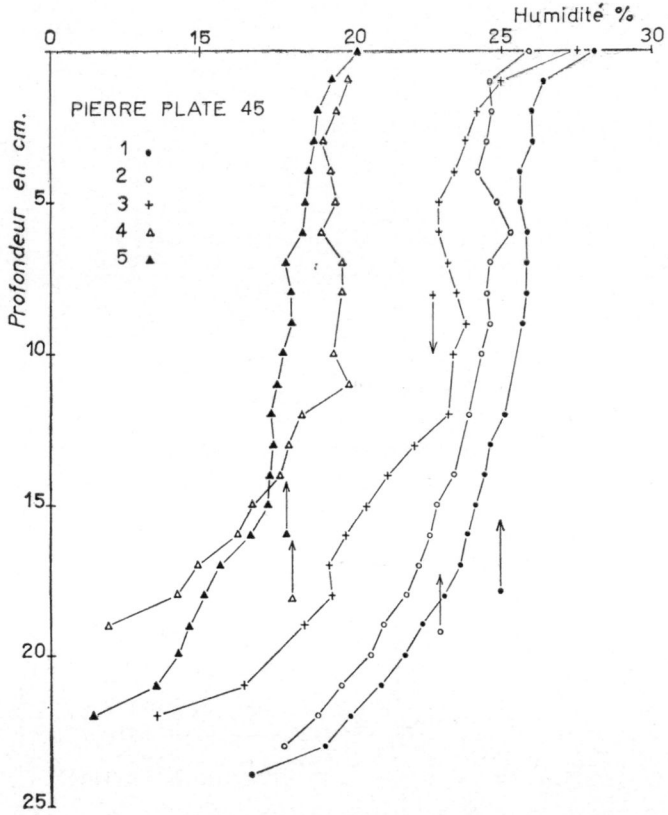


FIG. 16. — *Profils hydriques Pierre-Plate 45.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,506 2 : 0,410 3 : 0,195
4 : 0,084 5 : 0,035

La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport I/V (cf. chap. V).

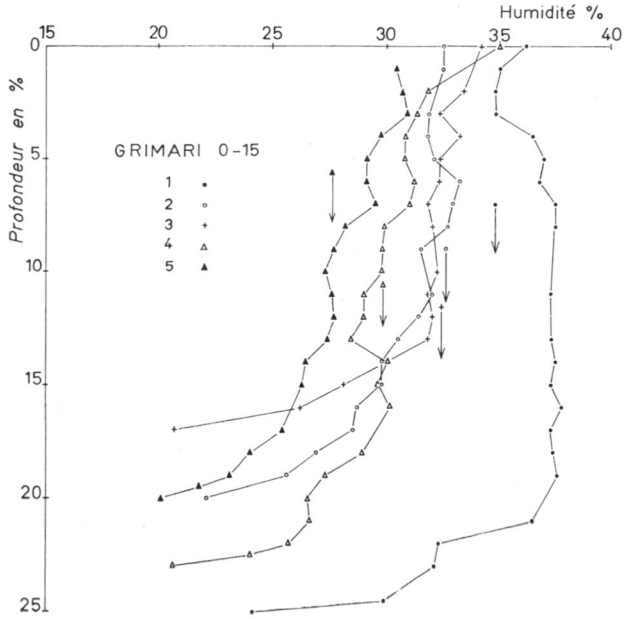


FIG. 17. — *Profils hydriques Grimari 0 — 15.*
Intensités mm/mn : 1 : 0,520 2 : 0,140 3 : 0,125
4 : 0,054 5 : 0,014

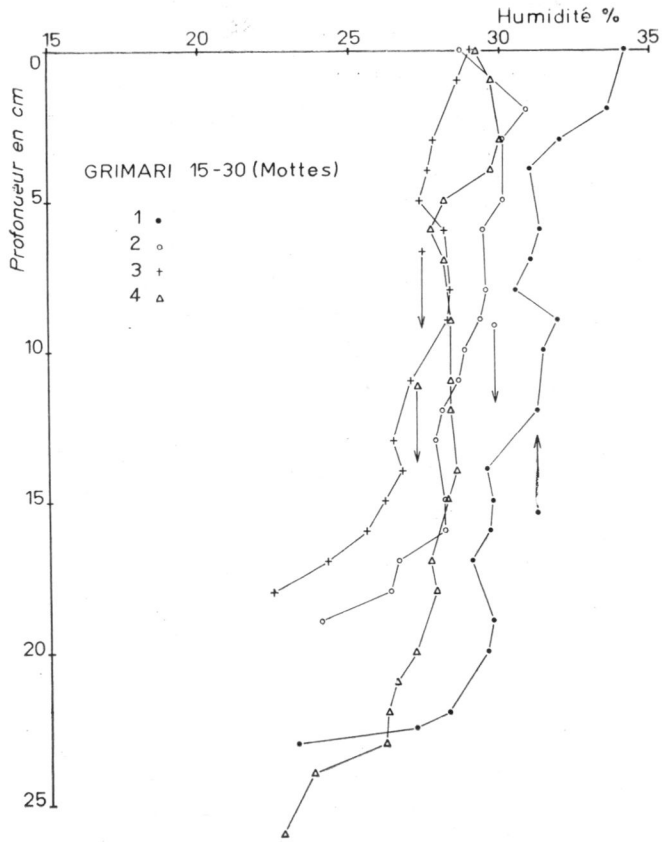


FIG. 19. — *Profils hydriques Grimari 15 — 30 (mottes).*
Intensités mm/mn : 1 : 0,643 2 : 0,286 3 : 0,082
4 : 0,045

La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport I/V (cf. chap. V).

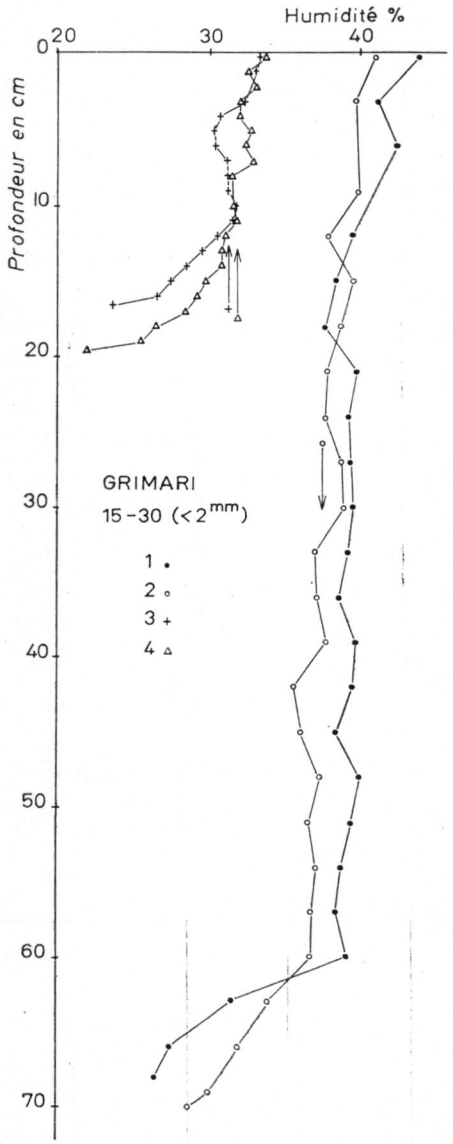


FIG. 18. — *Profils hydriques Grimari 15 — 30 < 2 mm.*
Intensités mm/mn : 1 : 1,673 2 : 0,784 3 : 0,112
4 : 0,049
La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport I/V (cf. chap. V).

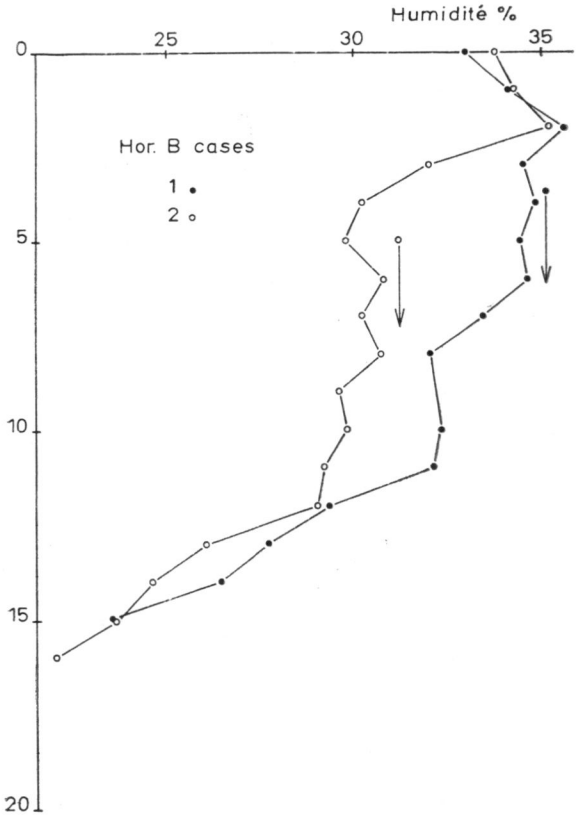


FIG. 20. — *Profils hydriques Hor. B. cases*
Intensités mm/mn : 1 : 0,337 2 : 0,156
La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport I/V (cf. chap. V).

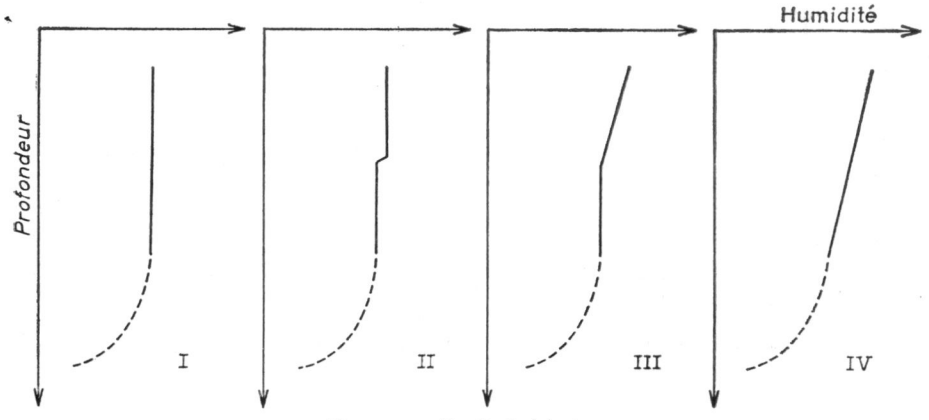


FIG. 21. — *Profils hydriques.*
Types de zone intermédiaire.

qu'une partie relativement faible de la tranche humectée, à l'exception de Grimari 15 — 30 (1,673).

Le type II comporte *deux paliers à humidité constante.* Nous rencontrons des profils expérimentaux de cette forme avec les mêmes sols que précédemment, à savoir : Grimari 0 — 15 (0,014 — 0,054), Grimari 15 — 30 (0,049 — 0,784), Grimari 15-30 *mottes* (0,0453 — 0,286 — 0,643) ainsi que pour deux essais avec des sols argilo-limoneux moyennement stables : Hor. B (0,337) et Closeaux 50 (0,052 2). Pour ces deux derniers cas le rapprochement avec le type II est d'ailleurs peu net. Par contre les deux paliers apparaissent nettement avec les sols argilo-sableux stables. Là encore il est impossible de rattacher la présence de ce type de profil à une intensité de pluie.

Les deux paliers se situent à des taux d'humidité assez voisins, avec une différence de 2 à 3 p. 100 seulement.

Le type III comporte de bas en haut *un palier à humidité constante surmonté d'une zone à gradient plus ou moins prononcé.*

Cette allure se rencontre essentiellement avec les sols argilo-limoneux : Closeaux 15 — 25 (0,078 — 0,184), Closeaux 50 (0,018 9 — 0,021 3 — 0,123), Hor B (0,156) ainsi que pour un essai sur sol sableux : Pierre-Plate 45 (0,195), Dans tous ces cas le palier à humidité constante est peu développé (moins de 10 cm).

Le type IV ne comporte *qu'une zone à gradient faible.* Nous le trouvons pour les essais avec les sols sableux qui ne donnent pas de profil du type I. Nous le rencontrons également pour les sols argilo-limoneux lorsqu'ils ne présentent pas le profil de type III. Pour ces sols il semble lié aux fortes intensités d'arrosage : Closeaux 15 — 25 (0,123 et 0,355), Closeaux 50 (0,196 et 0,556). Ce type de profil est donc assez fréquent. RUBIN et *al.* (1964) l'ont observé avec un sol argileux. Il va sans dire que lorsqu'il se présente, il est assez difficile de distinguer la zone à fort gradient de la zone à faible gradient, aucune solution de continuité nette ne séparant ces deux zones.

On voit donc que, strictement parlant, la zone intermédiaire à humidité constante est relativement peu fréquente. Néanmoins, et compte tenu des difficultés expérimentales, il ne faut pas surestimer les variations que nous avons relevées. En effet dans les types III et IV l'humidité ne varie que de 2 à 3 p. 100 de bas en haut de la zone intermédiaire. Donc, globalement, la zone intermédiaire a une humidité peu variable, sinon constante, et il semble que pour cet aspect du problème le processus schématique soit vérifié, du moins pour certains sols. Nous avons noté en effet que les types I et II (qui en est voisin) se rencontrent surtout avec les sols argilo-sableux stables et les sols sableux. Il est vraisemblable que plus le matériau étudié est instable au contact de l'eau, plus on s'éloigne des représentations simples.

2° *Correspondance entre* z_i *et* z_f

La *zone à fort gradient d'humidité* est délimitée en bas par le front et en haut par une transition plus ou moins nette avec la zone intermédiaire. Elle est parfaitement caractérisée par une croissance, de plus en plus lente, de l'humidité de bas en haut. Elle apparaît sans aucun doute possible dans toutes les expériences.

Nous avons apprécié l'épaisseur z_f de cette zone sur les graphiques. Dans les cas où la zone intermédiaire a une humidité relativement constante, z_f peut être mesuré avec une précision de l'ordre du cm. Au contraire, dans les cas où la zone

intermédiaire accuse elle-même un gradient d'humidité, la limite entre ces deux zones est obligatoirement assez floue. Aussi les valeurs portées sur le tableau 6 donnent-elles plutôt un ordre de grandeur.

Le premier résultat qui apparaît est que, pour un sol donné, l'épaisseur z_f dépend de l'intensité de l'arrosage.

TABLEAU 6

Zone à fort gradient d'humidité ou « zone d'humectation »

Sol	Intensité I (mm/mn)	Épaisseur de la zone à fort gradient (z_f cm)	z_i cm (1)	Sol	Intensite I (mm/mn)	Épaisseur de la zone à fort gradient (z_f cm)	z_i cm (1)
Closeaux 15 — 25	0,355	11	2	Pierre-Plate 15	1,80	13	2
	0,184	11	8		0,75	11	2
	0,123	9	7,5		0,42	10	2
	0,078	5	3,5		0,205	9	6
					0,077 5	9	9
Closeaux 50	0,556	8	1,5	Pierre-Plate 45	0,506	11-12	4
	0,196	6	5		0,41	11,5	ε
	0,123	?	7,5		0,195	10	3
	0,052	?	5,5		0,084	7	ε
	0,018 9	8,5	5,5				
Grimari 0 — 15	0,52	4	ε	Grimari 15 — 30 (mottes)	0,64	10	ε
	0,14	5	3		0,286	8,5	ε
	0,125	4	3		0,082	8	7
	0,054	6	5,5		0,045	6	8
Grimari 15 — 30	1,67	4	ε	Hor. B			
	0,78	5	ε		0,337	9	2
	0,112	5,5	3		0,156	6	3,5
	0,049	7,5	3,5				

(1) z_i est la profondeur à partir de laquelle la vitesse d'avancement du front est constante.

Toutefois il est difficile de prévoir le sens de cette relation. La tendance générale paraît être à un accroissement de z_f avec l'intensité. Mais nous avons constaté dans un cas (Grimari 0 — 15) une constance relative de cette grandeur, et dans un autre cas (Grimari 15 — 30) une relation inverse.

Au contraire la longueur de z_i est d'autant plus faible que l'intensité d'arrosage est élevée. Ceci se produit pour la plupart des sols étudiés.

Comme z_f n'est pas nettement déterminé par l'intensité, il s'ensuit qu'il y a rarement égalité entre z_i et z_f. D'une façon générale $z_i \leqslant z_f$. Cela revient à dire que la vitesse de progression du front, devient constante *avant* que la zone à fort gradient (z_f) ne soit formée. Il paraît donc y avoir une certaine indépendance entre ces phénomènes, contrairement à ce que laissait supposer le processus schématique énoncé au début de ce chapitre.

On est ainsi conduit à l'interprétation suivante : l'humidité qui se trouve au front d'humectation progresse avec une vitesse propre, dépendant de l'intensité d'arrosage. A l'arrière de ce front se produit une accumulation d'eau, relativement plus importante avec les intensités élevées.

3° *Vérification de l'existence du phénomène de translation*

Ce phénomène suppose qu'à partir du moment où la zone à fort gradient est formée, l'eau apportée contribue à allonger la zone intermédiaire, sans modifier la zone à fort gradient qui continue à avancer en conservant la même forme de profil hydrique.

Pour vérifier ce phénomène il suffit d'appliquer la même pluie à deux colonnes du même sol. Les prélèvements sont échelonnés dans le temps, de façon à obtenir un profil *sans* zone intermédiaire, et un autre *avec*. Nous avons choisi pour cet essai un sol ayant une zone intermédiaire à humidité relativement constante.

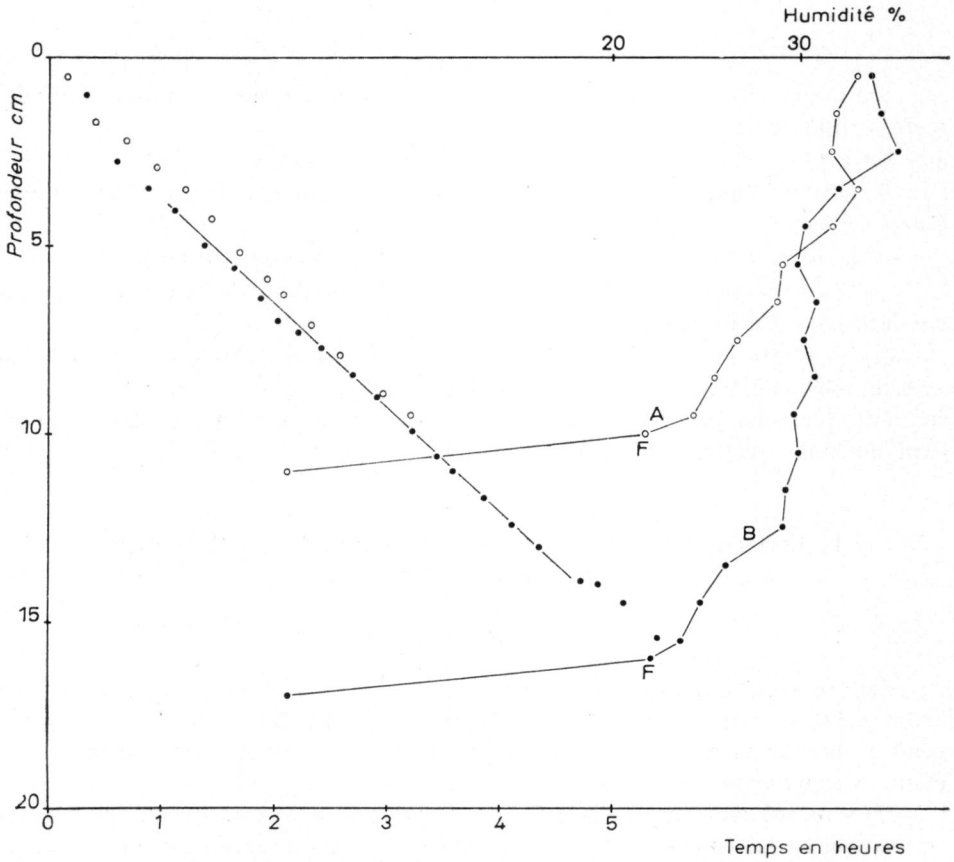


FIG. 22. — *Vérification expérimentale de l'effet de translation.*
Avancement du front et profils hydriques pour une même intensité et deux doses d'arrosage.
F : front Doses A : 30,4 mm B : 50,6 mm.

Cette expérience a été effectuée avec l'horizon B amené à une densité apparente de 1,2. Le débit d'arrosage a été de 0,156 mm/mn pour les deux colonnes. Pour la première (A) l'essai a été arrêté après un apport de 30,4 mm, pour la seconde (B) après un apport de 50,6 mm.

Les résultats sont les suivants (fig. 22) :

Les profondeurs humectées sont respectivement 10 cm et 16 cm. Dans les deux

cas, le front a progressé de 0,5 cm après la fin de l'arrosage. Son humidité est pratiquement identique pour les deux essais (21,9 et 22,0 p. 100). Au-dessus on note la zone à fort gradient d'humidité. Pour les deux colonnes elle a à peu près la même forme. La limite supérieure se situe à 29 p. 100. La colonne B comporte en outre une zone intermédiaire bien nette, avec une humidité voisine de 30 p. 100. Dans les deux cas la couche de surface est plus riche en eau.

Tout se passe donc comme si le profil B procède du profil A par simple allongement de la zone intermédiaire. L'effet de translation est donc vérifié pour ce sol. Selon RUBIN (1964) il apparaît également avec un sable mais n'est pas net avec un matériau argileux.

4° *Conclusions*

Nous constatons donc que le comportement schématique n'est que partiellement vérifié par l'expérience.

En effet :

— la translation de la zone à fort gradient existe bien, en tout cas avec l'exemple étudié, mais

— la zone intermédiaire n'a pas toujours une humidité constante,

— la correspondance entre z_i et z_f n'apparaît que dans de rares cas, et pour des intensités d'arrosage faibles.

Ces résultats montrent qu'il faudra reconsidérer le problème de l'infiltration avec un schéma différent de celui adopté jusqu'à présent. Une tentative dans ce sens sera faite plus loin (chap. IV). Au préalable, nous allons examiner d'autres données expérimentales relatives aux profils hydriques.

C. Variations des différentes caractéristiques du profil hydrique avec l'intensité d'arrosage

1° *Le front d'humectation*

Expérimentalement, c'est une couche de 0,5 à 1 cm d'épaisseur, limitée vers le bas par la séparation très nette entre la terre sèche et la terre humide. Elle correspond à un changement brusque de la teneur en eau, la couche sous-jacente claire étant beaucoup plus sèche (tabl. 7).

Pour un sol donné ce gradient dépend de l'intensité d'arrosage ; en effet, plus cette dernière est élevée, et plus l'humidité du front est grande, mais corrélativement l'humidité sous le front devient plus faible. Inversement, l'humidité sous le front est la plus élevée pour les intensités les plus faibles : cette tendance est particulièrement nette pour les sols « lourds », comme les Closeaux ; elle n'apparaît presque pas avec les sols argileux ferralitiques ni avec le sol sableux non-organique. Tout se passe comme si, au niveau du front, il y avait distillation de l'eau qui se condense plus bas sur la terre encore sèche. Il est logique qu'un tel phénomène ne soit observable que lorsque l'avancement du front est lent, et que la vitesse de déplacement de la vapeur est grande par rapport à celle de la phase liquide

La variation de l'humidité du front suivant l'intensité est donnée dans ce même

TABLEAU 7

Humidité (p. 100 de poids) dans et sous le front d'humectation

Sol	Arrosage (mm/mn)	Humidité %		Fond du tube	
		Front	Sous le front	Humidité	Distance au front (cm)
Closeaux 15 — 25	0,017 8	15,2	2,4	1,7	4
	0,029 7	16,4	2,2	2,1	9
	0,078	16,7	2,2	2,0	10,5
	0,123	17,5	1,7	1,5	6
	0,184	20,0	1,9	1,9	3
	0,355	19,3	1,5	1,5	4
Closeaux 50	0,018 9	18,3	4,2	3,7	6
	0,021 3	16,3	3,7	2,9	6
	0,052 2	20,2	4,0	3,3	4,5
	0,123	22,2	3,0	3,0	7
	0,196	25,9	3,5	3,4	4
	0,556	27,5	3,5	3,1	2
Grimari 0 — 15	0,014	20,1	2,3	1,7	6
	0,054 3	20,6	—	1,6	4
	0,125	20,7	1,8	1,6	7
	0,140	22,1	1,5	1,8	4
	0,52	24,1	1,7	1,3	3
Grimari 15 — 30	0,049	21,8	3,4	1,0	9,5
	0,112	23,4	1,4	1,4	9
	0,784	28,5	—	1,2	9
	1,673	—	—	—	—
Grimari 15 — 30 (mottes)	0,045 3	22,6	—	—	—
	0,082	22,4	1,3	1,4	8
	0,286	24,0	2,0	1,4	8
	0,643	23,2	1,1	1,1	5
Pierre-Plate 15	0,027 4	11,4	0,8	—	1
	0,077 5	12,5	1,3 à 0,9	0,6	22
	0,205	16,4	0,5	0,8	4
	0,42	18,5	0,7	0,7	19
	0,75	16,7	0,5	0,8	18
	1,80	22,1	0,6	0,6	2
Pierre-Plate 45	0,035 3	11,4	0,8	0,6	3
	0,084	11,9	0,5	0,5	6
	0,195	13,5	0,9	0,5	3
	0,41	14,2	0,6	0,5	3
	0,506	16,6	0,7	0,4	3
Hor. B.	0,156	22,0	2,6	2,4	10
	«	21,9	2,7	2,7	16
	0,337	23,5	2,6	2,6	11

tableau 7. Elle apparaît d'une façon plus claire sur des graphiques (fig. 23) dont l'examen révèle les résultats suivants :

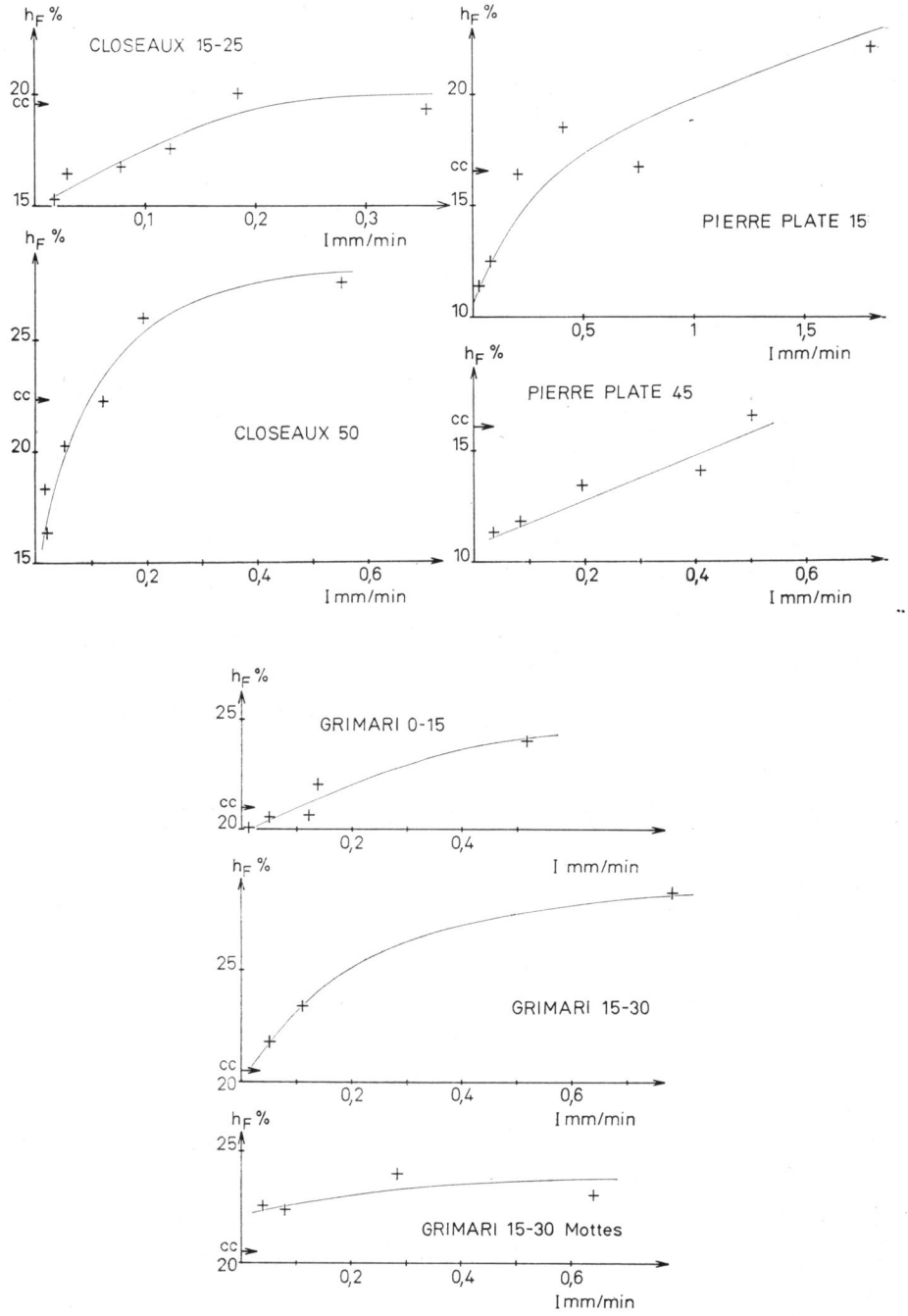


FIG. 23. — *Relation entre l'humidité du front* (h_f) *et l'intensité d'arrosage* (*I*).
cc : capacité au champ.

— Le front est d'autant plus humide que l'arrosage est plus intense, avec les terres tamisées à 2 mm. Pour la terre sous forme d'agrégats de 5 à 10 mm, elle semble au contraire assez constante et donc relativement indépendante de l'arrosage.

— La valeur de la *capacité au champ* est généralement située dans cette gamme, c'est-à-dire qu'il existe pour chaque sol des humidités du front inférieures ou supérieures à la capacité au champ. Cette dernière valeur n'apparaît donc en aucune façon comme une limite. Pour les sols « lourds » étudiés, à l'exception de Grimari 15 — 30, l'humidité du front est inférieure à la capacité du champ tant que le débit d'arrosage n'excède pas 0,15 mm/mn. Pour les sols sableux il en est de même tant que le débit d'arrosage est inférieur à 0,50 mm/mn. Donc, pour ces derniers, la gamme des débits pour lesquels l'humidité du front est inférieure à la capacité au champ est plus grande que pour les sols « lourds ». Pour Grimari 15 — 30, toutes les valeurs de l'humidité du front sont supérieures à la capacité au champ ; pour la fraction agrégée, elles l'excèdent de 2 à 3 p. 100. Remarquons que pour l'horizon de surface du même sol (Grimari 0 — 15) les humidités du front inférieures à la capacité au champ sont très voisines de cette dernière valeur : la différence n'excède pas 1 p. 100. Pour les sols lourds des Closeaux, ainsi d'ailleurs que pour les sols sableux, le front peut avoir des humidités beaucoup plus faibles que la capacité au champ.

— L'augmentation de l'humidité du front avec l'intensité d'arrosage est continue et monotone. Rapide au début, elle a tendance à devenir plus faible avec les intensités élevées : l'ensemble des points se répartit sensiblement sur une courbe d'allure asymptotique. Ne fait exception que le sol sableux non-organique (Pierre-Plate 45) pour lequel la croissance semble linéaire dans le domaine exploré, qui est d'ailleurs plus réduit que pour l'horizon organique du même sol.

L'augmentation de l'humidité du front est variable suivant les matériaux :

— avec les sols « lourds » des Closeaux, elle est rapide au-dessous de la capacité au champ, surtout pour le sous-sol limono-argileux ;

— avec les sols sableux, cette croissance est plus lente ;

— avec les sols argilo-sableux ferrallitiques, elle est soit très faible, soit inexistante (mottes).

Remarquons cependant que la comparaison avec la capacité au champ est purement indicative. Cette grandeur est en effet définie comme la quantité d'eau qui reste dans le sol après qu'un *drainage* rapide ait évacué l'eau excédentaire. L'humidité du front, au contraire, correspond à de l'eau qui pénètre dans un sol *sec*. On a toutes les raisons de penser que ce n'est pas la même porosité qui est concernée dans les deux cas.

Il faut cependant retenir de ces expériences que l'humidité du front n'est pas indépendante de l'intensité d'arrosage, et que la variation est différente suivant la nature du sol.

Nous avons montré précédemment que la vitesse du front elle aussi varie avec l'intensité. On peut penser alors qu'il existe une relation entre cette vitesse et l'humidité du front. Comme d'après certains travaux (Green, 1963) c'est le gradient de succion au niveau du front qui gouverne l'infiltration, nous avons cherché à le vérifier à l'aide des données expérimentales. Les valeurs de la vitesse sont portées sur un

graphique (fig. 24) en regard des gradients d'humidité (à défaut des gradients de succion difficilement mesurables dans un système dynamique en humectation). D'après ces résultats, il apparaît que pour les faibles vitesses, celles-ci sont d'autant plus grandes que le gradient est élevé. Au delà, les vitesses sont indépendantes de

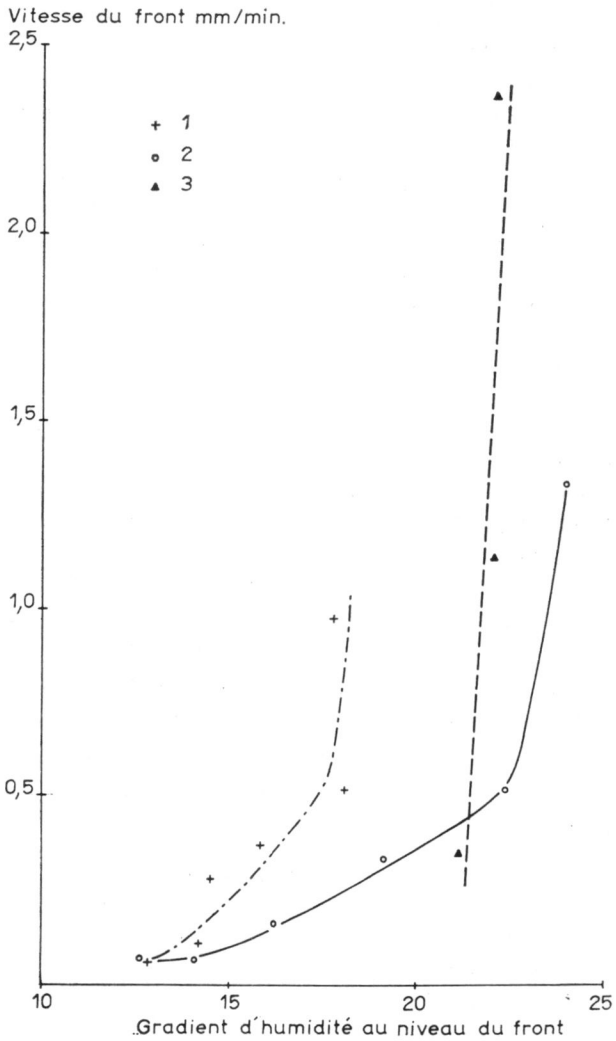


FIG. 24. — *Variation de la vitesse du front avec le gradient d'humidité au niveau de ce dernier.*
Gradient = h (front) — h (sous le front). Les prélèvements sont distants de 1 cm.
1 : Closeaux 15 — 25.
2 : Closeaux 50.
3 : Grimari 15 — 30 (mottes).

ce gradient. Cette dernière situation couvre tout le domaine étudié pour le sol en mottes. Dans ces conditions, il est difficile d'admettre que la vitesse d'infiltration soit déterminée par le gradient d'humidité tel qu'il est mesuré.

2° *La zone intermédiaire*

Nous avons noté précédemment que l'*allure* de la zone intermédiaire peut être modifiée par l'intensité d'arrosage et la nature du sol. Ici nous allons considérer uniquement l'humidité moyenne (1) de cette partie du profil hydrique, et étudier sa variation avec l'intensité d'arrosage.

Certains auteurs ont déjà fait état de l'influence de l'intensité sur la saturation du sol. Pour la plupart d'entre eux (EMERSON et GRUNDY, 1954 ; YOUNGS, 1960 ;

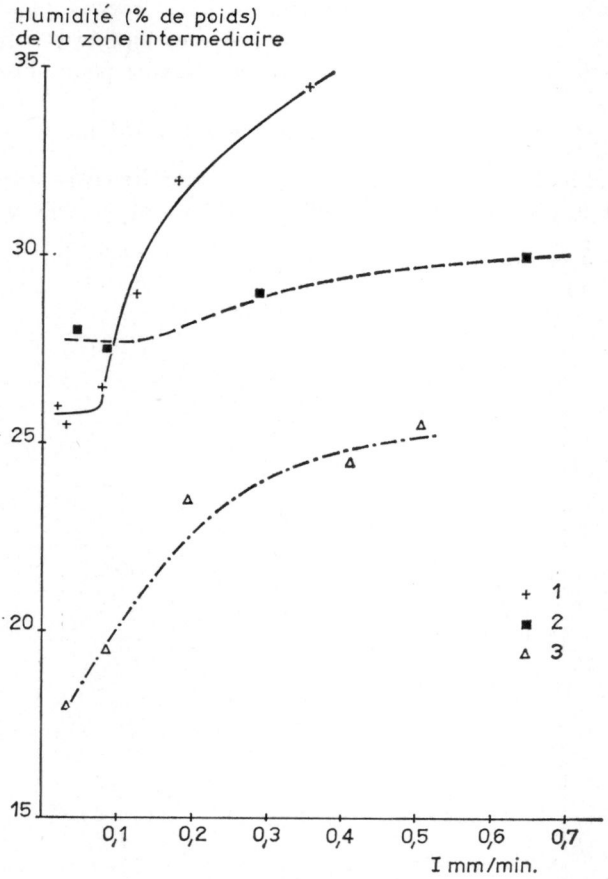


FIG. 25. — *Variation de l'humidité de la zone intermédiaire avec l'intensité d'arrosage.*
1 : Closeaux 15 — 25.
2 : Grimari 15 — 30 (mottes).
3 : Pierre-Plate 45.

RUBIN et *al.*, 1964) l'humidité est d'autant plus élevée que l'arrosage est intense. Les résultats de MARSHALL et STIRK (1949), bien qu'exprimés en succions et non en teneur en eau, laissent également supposer une telle tendance.

Pour nos sols, cette variation apparaît d'une façon tout à fait nette (fig. 25). On remarque cependant un fait nouveau : *pour les faibles intensités, l'humidité de la zone intermédiaire est pratiquement indépendante de l'arrosage.*

(1) Nous avons pris la moyenne des humidités extrêmes de la zone intermédiaire.

En effet pour trois des matériaux étudiés (Closeaux et sous-sol de Grimari) les profils correspondant aux deux plus faibles intensités sont même légèrement plus saturés avec l'intensité la plus réduite. Avec le sol en mottes ils sont superposés (voir fig. 13, 14, 18, 19).

Ce comportement nous permet de définir un nouveau concept : *l'humidité minima à l'infiltration*, qui est précisément cette humidité indépendante de l'intensité d'arrosage.

Néanmoins cette grandeur particulière ne se manifeste pas avec les deux sols sableux ni avec l'horizon de surface de Grimari.

Pour ce qui est de la croissance de l'humidité avec l'intensité, elle est variable suivant les sols. Nous aurons l'occasion de revenir sur ce point (chap. V).

3° « *Engorgement* » *du profil au-dessus du front*

Pour un profil hydrique donné, la différence d'humidité entre le front et la zone intermédiaire est le deuxième (1) paramètre caractérisant la zone à fort gradient

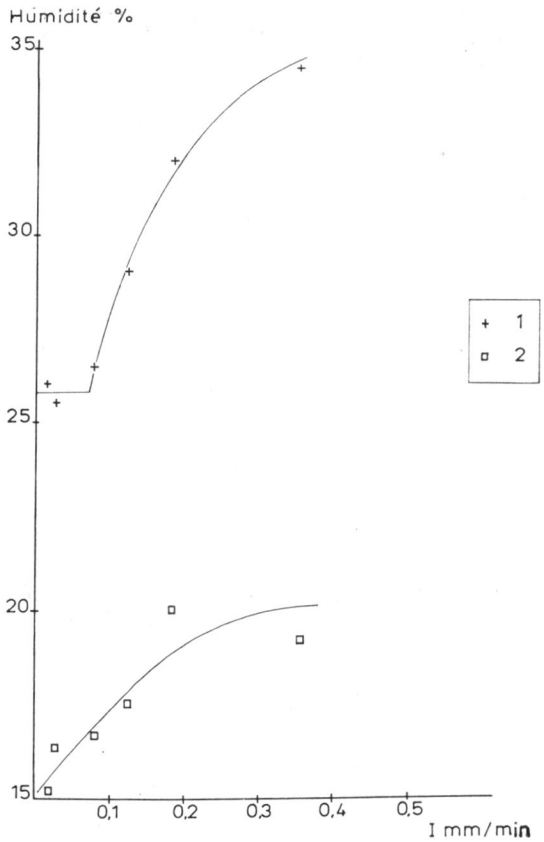


FIG. 26. — *Variation comparée de l'humidité de la zone intermédiaire* (1) *et de l'humidité du front* (2) *avec l'intensité d'arrosage.*
Closeaux 15 — 25.

(1) Le premier étant le développement en profondeur z_f de cette zone, examiné plus haut.

TABLEAU 8

« Engorgement » du profil au-dessus du front

Sol	Arrosage (mm/mn)	Humidité %		
		Zone intermédiaire (1)	Front	Différence (2)
Closeaux 15 — 25	0,017 8	25-27	15,2	11
	0,029 7	25-26	16,4	9
	0,078	26-27	16,7	10
	0,123	28-30	17,5	11,5
	0,184	31-33	20,0	12
	0,355	34-35	19,3	15
Closeaux 50	0,018 9	28-30	18,3	11
	0,021 3	28-29	16,3	12
	0,052 2	31-33	20,2	12
	0,123	31-34	22,2	10
	0,196	35-37	25,9	10
	0,556	38-40	27,5	11,5
Grimari 0 — 15	0,014	27-30	20-1	8,5
	0,054	29-31	20,6	9,5
	0,125	31-33	20,7	11
	0,140	31-33	22,1	10
	0,52	37-38	24,1	13,5
Grimari 15 — 30	0,049	31-33	21,8	10
	0,112	30-32	23,4	8,5
	0,784	38-39	28,5	10
Grimari 15 — 30 (mottes)	0,045	27-29	22,6	5,5
	0,082	27-28	22,4	5,0
	0,286	28-30	24,0	5,0
	0,643	29-31	23,2	7,0
Pierre-Plate 15	0,027	20-21	11,4	9
	0,077	22-23	12,5	10
	0,205	25-26	16,4	9
	0,420	28-29	18,5	10
	0,750	30-31	—	—
	1,800	37-38	21,2	15,5
Pierre-Plate 45	0,035	17-19	11,4	6,5
	0,084	18-20	11,9	7,5
	0,195	23-24	13,5	10
	0,410	24-25	14,2	10,5
	0,506	25-26	16,6	9
Hor. B.	0,156	30-31	22,0	8,5
	0,337	33-35	23,5	11,5

(1) Valeurs extrêmes
(2) Valeurs arrondie

d'humidité, ou zone d' « humectation » d'après BODMAN et COLMAN (1943). Nous l'appellerons « engorgement de la zone d'humectation ». La connaissance de ce paramètre peut aider à comprendre le mécanisme de l'infiltration. En effet si aucun obstacle ne se présentait à l'avancement de l'eau, on aurait simplement un front et derrière lui une zone unique à humidité constante : à la limite c'est ce qu'on observe lorsque de l'eau pénètre dans un tuyau, ou qu'elle s'élève dans un tube capillaire. Le fait que dans un corps poreux comme le sol l'humidité ne soit pas constante à l'arrière du front indique qu'il y a un « freinage » qui s'exerce de façon variable à différents niveaux. Par suite, une partie de l'eau est retardée dans son mouvement descendant.

Puisqu'aussi bien l'humidité du front que celle de la zone intermédiaire augmentent avec l'intensité d'arrosage, on est amené à considérer leur variation relative. Les données du tableau 8 montrent que l'« engorgement » varie relativement peu avec l'intensité, tant que celle-ci est réduite. La tendance serait à une augmentation, mais très faible. Elle est cependant confirmée par les « engorgements » nettement plus marqués avec les intensités maxima employées. Cela tient à ce que l'humidité de la zone intermédiaire augmente plus vite que celle du front (fig. 26). Tout se passe donc comme si il y avait un « freinage » relativement plus important avec les arrosages forts.

On notera en outre que l'engorgement est peu différent d'un sol à l'autre. Les propriétés texturales interviennent donc peu sur ce phénomène. Par contre, on observe un effet très net de la structure : avec le sol en mottes l'engorgement est moins prononcé qu'avec le même sol tamisé à 2 mm.

4° *La zone superficielle*

Nous considérons comme zone superficielle les deux ou trois centimètres supérieurs de la colonne, qui surmontent la zone intermédiaire.

Trois cas se présentent : ou bien l'humidité en surface est nettement plus forte que dans le reste du profil, ou bien elle est du même ordre de grandeur, ou enfin elle est plus faible.

Ce dernier cas est assez exceptionnel : il faudrait l'attribuer soit à une évaporation (peu probable en raison des précautions prises pendant les expériences), soit plutôt à une redistribution de l'eau à l'issue de l'arrosage ; cette dernière hypothèse semble confirmée par le fait que le gradient inversé se trouve surtout avec les arrosages de forte intensité, et donc des profils hydriques riches en eau. Il y a là une difficulté expérimentale inhérente au phénomène étudié.

Dans la majorité des cas l'humidité en surface est soit voisine, soit nettement supérieure à celle de la zone intermédiaire. Une accumulation d'eau en surface se trouve d'une façon particulièrement nette avec tous les essais conduits avec le sol sableux non-organique et peu stable (Pierre-Plate 45), avec plusieurs essais conduits avec le sol sableux organique (Pierre-Plate 15). Pour les matériaux caractérisés par une zone intermédiaire du type I ou II, c'est-à-dire avec un ou deux paliers à humidité relativement constante (c'est le cas du sol argilo-sableux stable) la couche de surface a généralement une humidité voisine de celle du palier supérieur pour les faibles intensités d'arrosage, alors qu'avec les pluies plus fortes l'engorgement en surface serait plus prononcé. Cette distinction correspond plus à une tendance qu'à un ordre bien défini. Enfin pour les sols argilo-limoneux peu stables (Closeaux), où la zone

intermédiaire est du type III ou IV, la couche de surface est purement et simplement le prolongement de cette zone : dans ce cas on ne peut même pas parler d'une couche de surface bien différenciée car il n'y a pas de changement brusque d'humidité.

Il semble donc qu'en règle générale les intensités d'arrosage élevées tendent à provoquer une accumulation d'eau dans la partie supérieure de la colonne de terre. Un effet structural vient se superposer au précédent, comme nous l'avons déjà montré (FEODOROFF, 1960) : l'engorgement superficiel est favorisé par la finesse de la structure et par sa mauvaise stabilité au contact de l'eau.

D. Résumé et conclusions

La constatation essentielle est que les profils hydriques en cours d'arrosage par aspersion ne revêtent pas une allure constante quels que soient le sol et l'intensité d'arrosage.

Avec les sols argileux à structure stable et les sols sableux, la tendance est à un profil rectiligne au-dessus de la zone à fort gradient. Pour les autres, au contraire, on assiste à une accumulation graduelle d'eau de bas en haut. Cette première considération limite déjà le champ d'application du processus, exposé au début de ce chapitre, à une certaine catégorie de matériaux. Mais la non-concordance entre l'aspect dynamique de l'infiltration et la distribution de l'eau dans le sol ($z_i \neq z_f$) le rend tout à fait invraisemblable. Ce processus doit être repensé sur des bases nouvelles, conformes à l'expérience : nous allons nous y employer au chapitre suivant.

L'influence de l'intensité d'arrosage est prépondérante. La distribution de l'eau est affectée à tous les niveaux : front et sous le front, zone intermédiaire, et, d'une façon moins systématique, couche de surface. Mais la constance de la zone intermédiaire dans une certaine gamme de faibles intensités, caractérisant ainsi le nouveau concept d'humidité minima à l'infiltration, introduit encore une donnée complémentaire dans ces comportements fort complexes.

Ann. agron., 1965, **16** (2), 177-202.

INFLUENCE PRÉDOMINANTE DES ARGILES ILLITIQUES SUR L'ALIMENTATION POTASSIQUE DES PLANTES DANS DIVERS TYPES DE SOLS

R. BLANCHET [1], J. GUYOT, J. CHAUSSIDON, J. CROUZET
et Colette CHAUMONT

Station agronomique de Châteauroux (Indre),
Station centrale d'Agronomie, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Une étude comparée de l'alimentation potassique des plantes a été effectuée en vases de végétation sur des sols appartenant à des types très divers, soumis d'autre part à un examen détaillé de leur constitution et de leurs propriétés, en particulier quant à la nature de l'argile. Les résultats ont été confrontés aux observations fournies par l'expérimentation au champ. Ils font apparaître une sorte d'équilibre dynamique, qui s'établit entre la plante et le sol dans l'alimentation potassique, et sur lequel l'ensemble des argiles illitiques exerce une influence prépondérante. Les implications concernant la fertilisation sont discutées.

INTRODUCTION

Les relations entre l'alimentation potassique des plantes et la teneur des sols en argiles, ainsi que la nature de celles-ci, peuvent être envisagées sous deux angles principaux (VAN DER PAAUW, 1956) :

1° Les bilans de potassium, mettant principalement en évidence les rétrogradations d'ions K^+ apportés, ou inversement les libérations de potassium non échangeable initialement (AUDIDIER et *al.*, 1962). Les diverses argiles possèdent à cet égard des propriétés très différentes (SCHUFFELEN et VAN DER MAREL, 1955).

2° L'influence de la nature des argiles et de leur abondance dans le sol sur l'alimentation des plantes proprement dite, c'est-à-dire sur la vitesse et le degré

[1] Adresse actuelle : Station d'agronomie. Toulouse. (Haute-Garonne).

d'utilisation, par les cultures, des réserves d'ions K^+ échangeables du sol. C'est à ce dernier aspect que nous nous sommes particulièrement attachés. Des constatations assez discordantes apparaissent dans la littérature :

— Traditionnellement, on admet que, pour assurer aux cultures une bonne alimentation, les sols doivent être d'autant mieux pourvus en potassium échangeable qu'ils sont plus argileux. Ainsi, STRASMAN et *al.* (1958) ont mis en évidence une corrélation nette entre le rapport K^+/CEC et la réaction de divers sols aux engrais potassiques.

— Inversement, nous avons montré que, en raison de l'absorption préférentielle du potassium par rapport aux cations Ca^+ et Mg^+, ce rapport K^+/CEC n'exerce en lui-même qu'une action très secondaire sur l'alimentation (BLANCHET et *al.*, 1962), du moins en l'absence d'argiles illitiques. En comparant entre eux les résultats de diverses expérimentations, FRANC DE FERRIÈRE et *al.* (1960) ont fait apparaître les différences de comportements des sols selon la nature de leurs argiles, et en particulier le rôle des illites.

— Ces questions demeurent néanmoins très controversées, et d'autres auteurs s'inspirant des travaux de WOODRUFF (1960), ont tenté une interprétation générale de l'alimentation potassique d'après des caractéristiques énergétiques (ARNOLD, 1962). Si ce mode d'approche peut s'avérer fécond, les énergies mises en jeu par les mouvements d'ions K^+ dans le sol sont cependant faibles en valeur absolue, et ne constituent pas forcément un facteur prépondérant de l'absorption du potassium par les végétaux (BLANCHET, 1959).

En comparant l'alimentation potassique des plantes dans des sols très divers, soumis à une étude approfondie, nous avons tenté de dégager le rôle de divers facteurs, en particulier celui des argiles illitiques.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

1° *Sols étudiés*

Ces sols représentent les principaux types de la région Centre-Ouest, et ont été décrits par ailleurs (STUDER et BLANCHET, 1962), c'est-à-dire :

— rendzines et sols bruns calcaires sur calcaire jurassique dur ;
— sols bruns calcaires sur calcaires marneux liasiques ;
— sols bruns sur divers placages de « limon des plateaux » ;
— sols diversement lessivés, soit sur roches éruptives ou métamorphiques (granulites, gneiss, micaschistes), soit sur argiles et sables à silex provenant de la décalcarification des craies sénonienne et turoniennes ;
— sols lessivés et à tendance podzolique, hydromorphes, formés sur les dépôts tertiaires de la Brenne et de formations voisines (PÉRIGAUD, 1963).

Cet ensemble de 31 sols représente donc un éventail très large de roches-mères et de degrés d'évolution. Beaucoup d'entre eux ont porté des expérimentations en plein champ de fumures potassiques. La détermination de la nature des argiles, ainsi que des essais en vases de végétation, ont été effectués sur les couches arables de ces sols.

2° *Étude des argiles*

a) *Extraction.*

Les sols ont été traités, jusqu'à élimination de la plus grande partie de la matière organique et début de dispersion de l'argile, par une solution de ClNa 0,2 N additionnée de ClK de telle sorte

qu'il n'y ait pas de pertes ou de gains appréciables de potassium par la terre (concentration nécessaire déterminée par des essais préalables). La fraction de diamètre apparent inférieur à 2 μ a été extraite après dispersion complémentaire par CO_3Na_2 à pH 8, puis traitée par Cl_2Ca 0,1 N pour obtenir une argile-Ca.

Cette technique d'extraction a fourni un matériau se prêtant bien aux études de diffraction des rayons X.

b) *Analyses chimiques.*

L'argile a été soumise à une attaque fluorhydrique, pour le dosage de K et Mg, selon la technique préconisée par JACKSON (1958). La capacité d'échange de cations a été mesurée, après traitement par Cl_2Ca et lavages successifs à l'eau, par déplacement de Ca à l'aide de ClH 0,1 N.

c) *Capacité de fixation du potassium*

Le but de cette manipulation est de déterminer la quantité totale de potassium susceptible d'être fixée par les argiles de type illitique ; ce caractère représente une sorte d'indice d'altération de ces minéraux. A cet effet, 1,2 g d'argile est placé pendant une nuit au contact de 20 ml d'une solution 2 N d'un mélange Cl_2Ca + ClK, avec un rapport $K^+/Ca^{++} = 1/3$, puis séché à 110°C ; le même traitement est répété trois fois. Après trois lavages par centrifugation à l'eau, puis lavage à l'éthanol, la teneur en K de l'argile est déterminée comme ci-dessus par attaque fluorhydrique. La différence avec la teneur initiale représente la quantité maximum de potassium pouvant être fixée par les argiles se rattachant au type illite (la présence de calcium empêche la « fermeture » de la montmorillonite).

d) *Libération de potassium.*

Celle-ci a été étudiée en milieu ClNa N, et en présence de tétraphénylborate de sodium, selon les techniques de SCOTT et REED (1960, 1962) : 1 méq. TPB Na pour 0,25 g d'argile, contact trois jours, filtration, lavage à l'eau distillée, et dissolution du précipité de TPB K par ébullition prolongée dans $ClNH_4$ 0,5 N.

De même que la teneur en K total, cette détermination a porté à la fois sur les argiles et les sols.

e) *La diffraction des rayons X.*

Cette étude a été effectuée au diffractomètre (radiation Cu Kα) sur films obtenus par évaporation de suspensions d'argile-Ca. Elle a porté à la fois sur les échantillons n'ayant pas subi de traitements complémentaires, et sur ceux qui ont été soumis à la fixation ou à la libération du potassium. Dans ce dernier cas, après le traitement par TPB Na, l'argile était lavée par centrifugation à l'acétone (trois lavages), puis à l'eau (deux lavages), et enfin dialysée de façon à éliminer totalement le tétraphénylborate de sodium, qui présente une diffraction élevée à 8,11 Å.

) *Mesures de surfaces.*

Celles-ci ont été effectuées selon la méthode de DYAL et HENDRICKS (1950), en observant la cinétique de l'évaporation du glycol, de manière à déterminer la proportion de réseaux expansibles permettant la formation de couches bimoléculaires de glycol (NADEAU, 1961). Les pesées ont été effectuées après mise à l'équilibre d'humidité de l'argile avec une solution saturée de bichromate de sodium. Les surfaces externes ont été mesurées après chauffage préalable de l'argile à 600°C (BOWER et GOERTZEN, 1959) ; les résultats n'ont été considérés qu'avec prudence, car il semble bien s'être produit dans certains cas des phénomènes de recristallisation ou de décomposition (DYAL et HENDRICKS, 1950).

g) *Interprétation des résultats.*

La proportion des diverses argiles dans le mélange extrait du sol a été appréciée d'après l'ensemble des éléments ci-dessus, qui concordent généralement bien entre eux : la densité de charges négatives superficielles, déduite de la surface et de la capacité d'échange de cations, est dans tous les cas voisine de $6{,}40 \cdot 10^4$ UES/cm² (CHAUSSIDON, 1961).

Cette constance de la densité de charges négatives superficielles, ainsi que l'examen des bilans de surfaces, capacités d'échange de cations, teneurs en potassium, etc., permettent de considérer que, dans la plupart des cas, les réflexions des rayons X correspondant à des réseaux de 10 Å sont dues à des illites plutôt qu'à des micas. L'abondance de micas se traduirait en effet par une discordance entre les résultats des diagrammes de diffraction des rayons X et les autres données.

L'exemple suivant indique de manière détaillée le mode d'interprétation (sol de rendzine ayant vraisemblablement reçu quelques apports tertiaires) :

Les caractéristiques de la fraction argileuse de cette terre sont :

K total p. 100 d'argile : 0,95, soit 1,14 p. 100 K_2O
Mg total p. 100 d'argile : 0,83
Surface totale : 352 m^2/g d'argile.

L'examen de la courbe d'évaporation du glycol montre l'existence d'une couche bimoléculaire de glycol d'un poids de : 93 mg/g, correspondant ainsi à une surface de $3{,}22 \times 93 = 299$ m^2/g d'argile.

Surface externe : 90 m^2/g.

CEC = 47,1 méq./100 g d'argile.

Rayons X : Pic relativement important à 15 Å = argile à réseau expansible : montmorillonite.

Réflexions basales 001 assez fortes.

Pic faible à 10 Å et à 5 Å correspondant aux réflexions basales 001 et 002 de l'illite : illite en faible quantité.

Pic important à 7,2 Å et 3,6 Å correspondant à la kaolinite. Réflexions basales 001-002 fortes.

Présence de quartz ; pas de chlorite apparente.

Interprétation (GRIMM, 1953).

En supposant que l'illite contient 6 p. 100 de K^2O, on obtient : Illite : $\frac{1{,}14 \times 100}{6} = 19$ p. 100.

soit sur la base de 200 m^2/g une surface totale de : 38 m^2/g.

Montmorillonite déterminée par la courbe d'évaporation du glycol, sur la base de 800 m^2/g : 209 m^2/g, soit 37 p. 100 de l'argile.

Compte tenu de la présence de quartz et de kaolinite, identifiés par les rayons X, et des bilans de surfaces et de capacités d'échanges, on peut attribuer à ce mélange d'argiles la composition figurant sur le tableau 1.

TABLEAU I

Utilisation des bilans de surfaces et capacités d'échange pour l'appréciation de la nature des argiles dans un mélange

Nature de l'argile	Proportion (%)	Surface totale (m^2/g)	C. E. C. calculée sur la base de : (méq./100 g)	C. E. C. correspondante (méq./100 g)
Illite	19	38	35	6,7
Montmorillonite	37	299	100	37
Quartz	5	(identifié aux rayons X)		
Total partiel.....	61			
		sur la base de 30 :		
Kaolinite 100 — 61 =	39	12	7	2,7
Soit total		349		46,4

3° *Équilibres sols-solutions*

Ceux-ci ont été étudiés en suivant la technique d'ARNOLD (1962), qui consiste à mesurer à force ionique constante une concentration critique d'équilibre, selon la conception qu'en avaient donnée pour le phosphore DEMOLON et BARBIER (1930). Ces essais ont été effectués à diverses températures bien contrôlées (20°, 40° et 60°C).

La vitesse de déplacement des ions K^+ échangeables par les cations Ca^{++} et NH_4^+ a été comparée, selon une technique précédemment exposée (BLANCHET et *al.*, 1962). Nous avons retenu, comme teneurs en potassium échangeable, celles qui ont été obtenues par l'acétate d'ammonium N

neutre lorsque, au cours de percolations fractionnées, cette solution n'extrait plus que des quantités infimes d'ions K^+.

Enfin, la technique de VAN DER MAREL et VENEKAMP (1955) a été appliquée aux sols, pour apprécier leurs pouvoirs de rétrogradation.

4° *Essais en vases de végétation*

Les divers sols étudiés ont été soumis à une culture d'orge, en vases de végétation. Les plantes recevaient des quantités largement suffisantes de tous les éléments autres que K, et trois doses différentes de ce dernier représentant environ 0,150 et 900 kg K_2O par hectare, soit 0,50 et 300 mg K par kg de terre. A la récolte, les quantités de potassium absorbées par les plantes ont été déterminées, ainsi que les teneurs en K échangeable des sols. Les bilans de potassium ont été calculés (rétrogradations, régénérations), ainsi que les rapports [K absorbé/K échangeable en fin de culture].

D'autre part, un essai d'épuisement en petits vases de végétation a été effectué pour mieux juger des possibilités de régénération des réserves échangeables, à partir des minéraux du sol (technique de CHAMINADE, 1960).

RÉSULTATS

I. *Principaux caractères de l'ensemble des sols étudiés*

Les sols très divers utilisés dans cet essai présentent à l'égard du potassium des propriétés très diverses, que nous résumerons brièvement. Il ne se trouve pas, parmi cet échantillonnage, de sols particulièrement jeunes, formés par exemple sur des alluvions récentes. Ils se sont tous constitués à partir de matériaux originels relativement anciens (les plus récents étant les placages de limons des plateaux), et ont évolué en fonction de leur pédoclimat et des propriétés de la roche-mère. Ils sont exploités selon des systèmes de culture très variés (céréales, polyculture, élevage...), et reçoivent des fumures potassiques très diverses, allant d'un bon entretien à une absence à peu près totale.

1° *Teneurs en potassium échangeable.*

Malgré la variété des fumures et des systèmes de culture, les teneurs en potassium échangeable sont une fonction peu étroite, mais cependant nette, des taux d'argile (graph. 1). Nous tenterons ci-dessous d'expliquer ce fait.

2° *Pouvoir adsorbant.*

Les capacités d'échange de cations varient de 6,5 à 23,2 méq. pour 100 g de sol, soit des rapports K^+/CEC allant de 0,017 à 0,084. Les isothermes de désorption des ions K^+, établies selon des techniques précédemment décrites (BLANCHET, 1959), mettent en évidence un très large éventail de pouvoirs adsorbants (graph. 2). Les concentrations d'équilibre (ARNOLD, 1962), varient de 4,5 à 150 mg K par litre.

3° *Nature des argiles.*

Ainsi que l'indique le tableau 2, la proportion des diverses argiles est assez variée. On observe cependant une relation assez nette entre la teneur globale en argile et la proportion d'illite proprement dite (minéraux dont l'épaisseur des feuillets

est de 10 Å). Les sols les plus argileux sont ainsi les plus riches en argiles illitiques, comme le montre le graphique 3. Cela est probablement dû au fait que les sols argileux, parmi cet échantillonnage, sont les moins évolués : pH légèrement alcalin, essivage faible ou nul..., n'ayant pas entraîné d'évolution poussée des minéraux micacés.

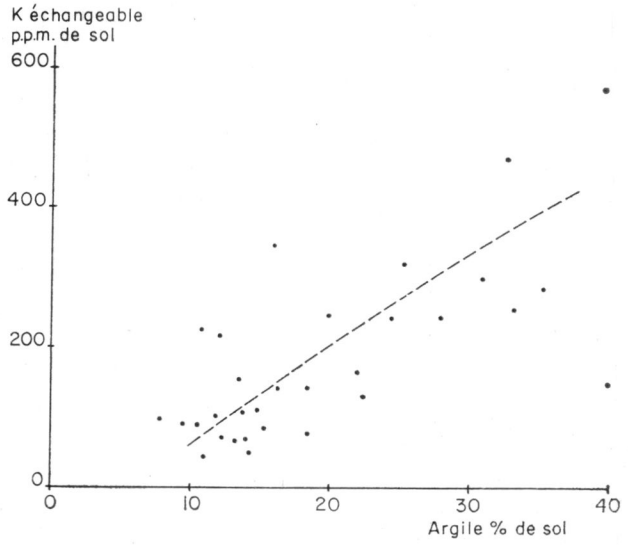


FIG. 1. — *Comparaison de la teneur des sols en potassium échangeable et en argile*

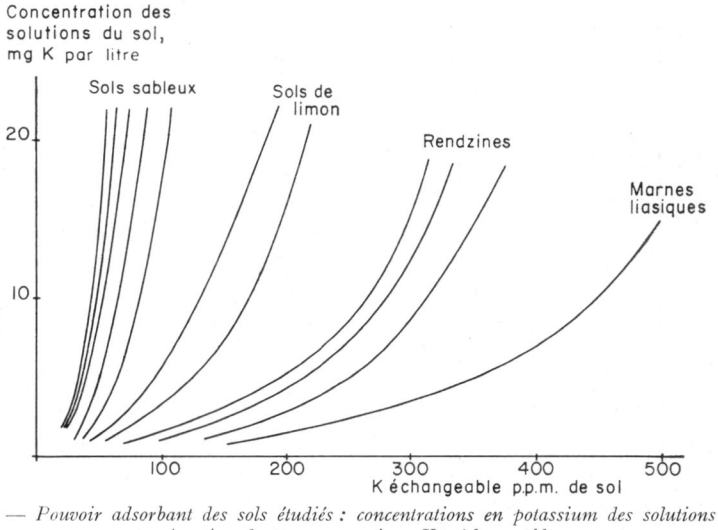


FIG. 2. — *Pouvoir adsorbant des sols étudiés : concentrations en potassium des solutions du sol en fonction des teneurs en ions K^+ échangeables*

4° *Fixations et libérations de potassium.*

Ces deux caractères sont assez liés aux types de sols, comme le montre le tableau 3 qui indique, pour chacun de ces types, les moyennes des données suivantes :

TABLEAU 2

Teneur des sols étudiés en argile, et nature de celle-ci

N°	Type de sol ou roche-mère	Argile en % de terre	Répartition des diverses argiles % du mélange				
			Kaolinite	Illite	Montmorillonite	Chlorite	Quartz
24		39,8		70	25	5	
25	Marnes liasiques	35,5	10	60	10	10	10
26		32,8	20	75	5		
9		28,0	15	40	40	5	
11	Rendzines	40,0	40	20	35		5
27		24,5	35	25	40		
30		25,3	30	40	30		
8		31,0	35	40	20		5
6	Sols bruns calcaires	33,3	50	40		10	
10		22,5	35	45	20		
31		16,0	35	50	5	10	
1	Sol brun	18,5	30	45	25		
2	Limons	16,3	20	50	20	10	
5		22,0	30	40	25		5
15		7,8	50	35	15		
16	Argiles à silex	10,8	60	30	10		
17		9,5	60	25	15		
29		14,0	20	60	5	15	
4		14,3	45	35	15		5
12	Dépôts éocènes	13,8	50	30	20		
14		12,3	50	45	5		
18	Micaschistes	20,3	35	60	5		
19		13,3	25	65		10	
3	Schistes	13,3	15	70		10	5
20	Gneiss	10,5	40	45	10		5
21		12,3	40	45		10	5
22	Granulite	18,5	45	55			
23		15,3	45	45	5	5	

TABLEAU 3

Rétrogradations et libérations d'ions K^+ dans les types de sols étudiés

Types de sols	K rétrograde % de K introduit (VAN DER MAREL)	K échangeable régénéré (essais d'épuisement) (p,p.m. de sol)	K extrait par TPBNa, p.p.m. de sol	
			par l'ensemble du sol	par la fraction argileuse
Marnes liasiques	28,7	303	3 400	1 450
Rendzines	35,6	157	950	370
Sols bruns calcaires	39,7	186	825	320
Limons	29,4	179	860	433
Argiles à silex	13,9	82	390	140
Dépôts éocènes	15,1	44	395	103
Micaschistes	20,0	155	763	240
Gneiss	23,0	230	1 825	230
Granulite	28,6	29	1 400	215

— K rétrogradé par voie sèche, selon la technique de VAN DER MAREL et VENEKAMP (1955), pour cent de la quantité introduite.

— K échangeable « régénéré » au cours des essais d'épuisement en petits vases de végétation.

— K extrait par le tétraphénylborate de sodium, d'une part dans l'ensemble du sol, d'autre part dans la fraction argileuse seule.

Les sols dérivés des sédiments liasiques, très peu évolués et très argileux, présentent de très fortes possibilités de libération d'ions K^+, et un pouvoir de fixation assez moyen. Dans les rendzines, sols bruns et limons, les possibilités de libération

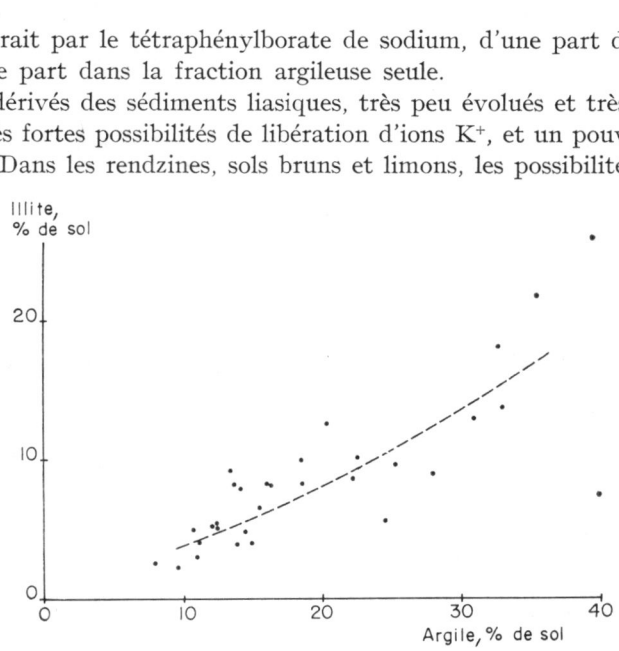


FIG. 3. — *Relation entre la teneur en illite p. 100 de sol et le taux d'argile*

sont plus faibles, et la tendance à la rétrogradation augmente. Les sols formés sur des argiles à silex et les dépôts éocènes sont relativement inertes à l'égard du potassium : ils présentent des cessions et rétrogradations également faibles. Enfin, chez les terres dérivées de roches éruptives ou métamorphiques, les fixations et libérations sont de nouveau appréciables ; les minéraux du sol autres que l'argile jouent alors un rôle particulièrement important dans la libération d'ions K^+ (MORTLAND, 1958).

II. *Comparaison de l'alimentation potassique des plantes dans ces divers sols, en vase de végétation.*

1° *Quantités de potassium absorbées.*

Le graphique 4 représente, en fonction des teneurs initiales des sols en potassium échangeable, les quantités de K absorbées dans les trois traitements comportant des apports respectifs de 0,50 et 300 mg K par kg de terre. Quoique la relation soit peu étroite, les quantités de potassium absorbées sont dans l'ensemble fonction des teneurs en K échangeable, surtout pour les apports 0 et 50 p.p.m. D'autres remarques peuvent également être faites :

— Pour un apport nul de potassium, les plantes ont absorbé en sols pauvres une fraction très importante des réserves : les points représentatifs se situent au voisinage de la bissectrice du graphique. Lorsque la richesse initiale du sol augmente, corrélativement avec un accroissement des teneurs en argiles et notamment en illites

(graph. 1 et 3), la courbe s'écarte de plus en plus de la bissectrice, indiquant une moindre utilisation des réserves de ces sols. Ceux-ci cèdent donc plus difficilement leurs ions K^+ aux plantes.

— En présence d'un apport modéré de potassium (50 p.p.m.) les phénomènes sont assez comparables.

— Lorsque l'apport de potassium est important (300 p.p.m.), on observe dans les sols sableux, initialement pauvres, une augmentation considérable de l'absorption. Cette augmentation est relativement moins importante dans les milieux argileux, initialement plus riches, qui sont ainsi beaucoup plus « tamponnés » à l'égard du potassium.

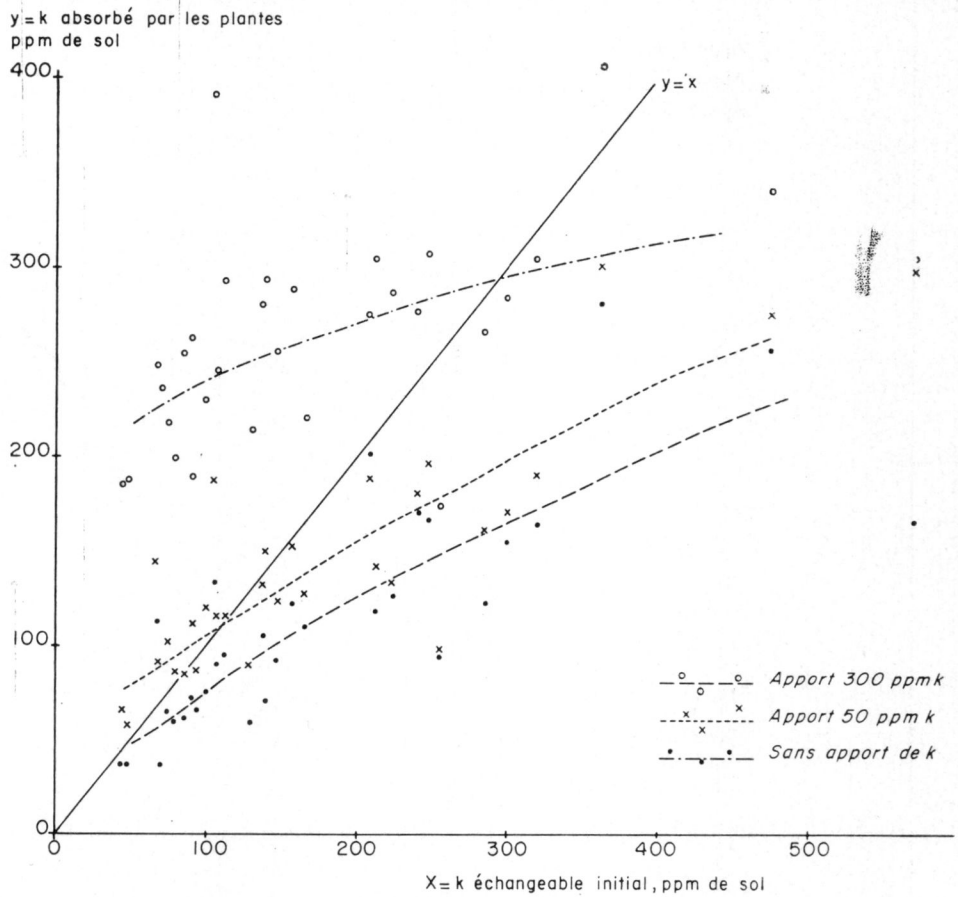


FIG. 4. — *Quantités de potassium absorbées par les plantes, en fonction des teneurs initiales en potassium échangeable*

2° *Teneurs des sols en potassium échangeable, en fin de culture.*

Les mêmes constatations se dégagent du graphique 5 qui représente, en fonction des teneurs des sols en argile, les quantités de potassium échangeable existant en fin de culture, selon les différentes fumures. Les sols initialement pauvres se sont peu enrichis en K échangeable, malgré le gros apport de 300 p.p.m, qui a été en grande partie absorbé par les plantes (graph. 4). Les sols qui étaient initialement les plus

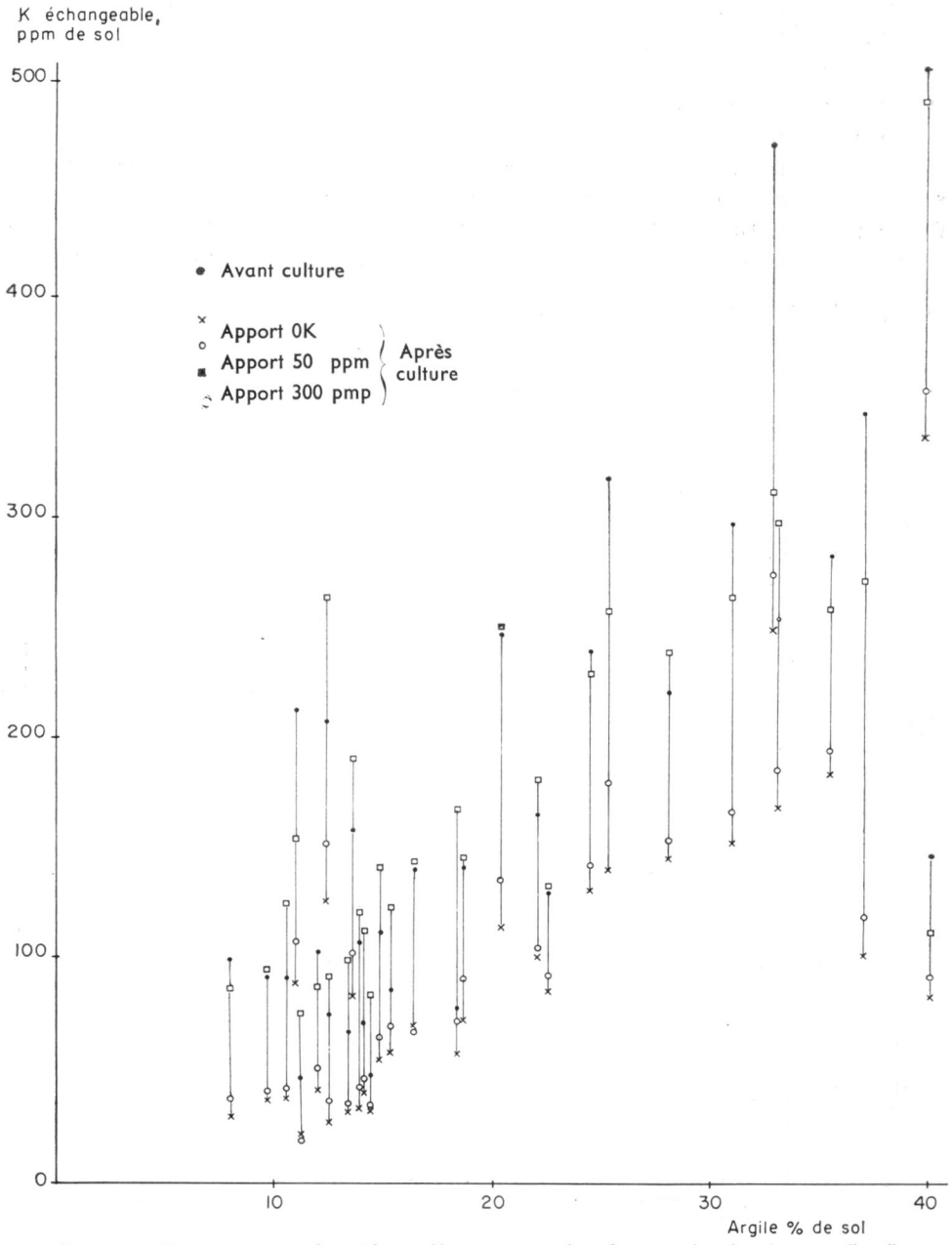


FIG. 5. — *Teneurs en potassium échangeable avant et après culture, en fonction des taux d'argile*

riches se sont généralement appauvris, mais leurs teneurs restent le plus souvent élevées, même lorsqu'ils n'ont pas reçu de fumure, et bien que les possibilités maxima l'absorption de potassium par les plantes ne soient pas atteintes.

Le tableau 4 donne quelques exemples détaillés de ces divers phénomènes. En ce qui concerne l'alimentation des plantes, ils font apparaître une grande plasticité

TABLEAU 4

Quelques exemples des principaux résultats obtenus, sur divers types de sols

N°	Type de sol	K échangeable initial (p.p.m.)	Apport (p.p.m.)	K échangeable final (p.p.m.)	Matière sèche produite (g/vase)	K absorbé (p.p.m.) de sol	K absorbé / K échang.	Concentration solution du sol (mg k/l)	Bilans de potassium		$\frac{\text{K extrait } Ca^{++}}{\text{K extrait } NH_4^+} \times 100$	
									K régénéré (p.p.m.)	K rétrogradé (p.p.m.)	3 percolations	10 percolations
4	Dépôts éocènes	49	0	33	52,5	37	1,14	4,5	21		71	105
			50	35	70	58	1,65			6		
			300	85	78,5	187	2,20			77		
15	Argile à silex	100	0	30	97	75,6	2,52	45	6			
			50	39	96	120	3,07		9			
			300	88	101,5	231	2,64			81		
19	Mica-schistes	159	0	84	74,1	122	1,46	55,5	47		74	104
			50	103	82,1	155	1,51		49			
			300	194	91,4	289	1,49			24		
22	Granulite	79	0	58	57,8	60	1,04	45	39		79	106
			50	73	60,5	87	1,20		31			
			300	170	75,4	200	1,17			9		
8	Sol brun calcaire	300	0	154	91,8	155	1,01	15	9		46	84
			50	169	89	172	1,02			9		
			300	268	103,5	285	1,06			47		
6	Sol brun calcaire	256	0	170	69,6	96	0,57	6,2	10		28	67
			50	188	62,9	99	0,52			19		
			300	300	73,8	174	0,58			82		
26	Sol brun sur lias	475	0	253	84,8	259	1,02	75	37		40	65
			50	278	82,8	277	1		30			
			300	415	84,4	342	0,82			18		

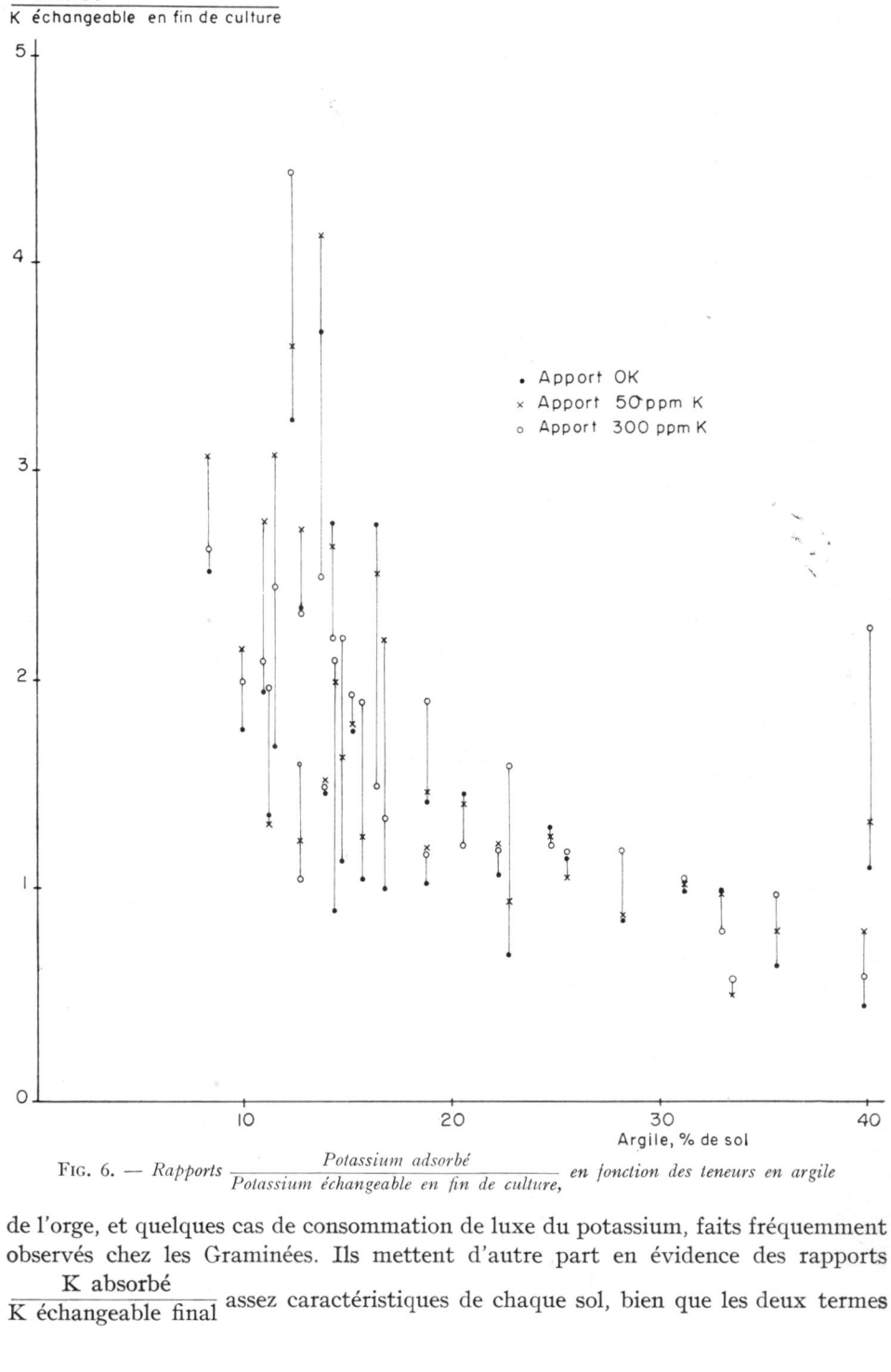


FIG. 6. — *Rapports* $\frac{\textit{Potassium adsorbé}}{\textit{Potassium échangeable en fin de culture}}$ *en fonction des teneurs en argile*

de l'orge, et quelques cas de consommation de luxe du potassium, faits fréquemment observés chez les Graminées. Ils mettent d'autre part en évidence des rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K échangeable final}}$ assez caractéristiques de chaque sol, bien que les deux termes

de ce rapport varient souvent considérablement selon la fumure apportée. Ces rapports expriment ainsi une sorte d'équilibre, de partage du potassium entre la plante et le sol. Leur valeur est d'autant plus élevée que le pouvoir adsorbant et la teneur des sols en argiles illitiques sont plus faibles.

Le graphique 6, qui représente les rapports [K absorbé/K échangeable final], en fonction du taux global d'argile des sols, illustre ces phénomènes. Dans l'ensemble, ces rapports diminuent au fur et à mesure que la teneur en argile augmente, pendant que l'amplitude de leur variation sous l'effet de la fumure, dans une même terre, devient de plus en plus faible. Le sol n° 11, qui fait nettement exception, renferme une assez forte proportion de montmorillonite (tabl. 2), alors que l'illite est dominante dans les autres sols très argileux.

Ces rapports, qui expriment l'aptitude des sols à céder aux plantes les réserves et les fumures potassiques, varient dans une proportion voisine de un à dix. Ils illustrent les différences considérables des milieux naturels quant à leurs possibilités d'assurer une bonne alimentation aux cultures.

3° *Relations avec la concentration en potassium des solutions du sol.*

Le graphique 7 montre que, de même que dans des essais précédents (BLANCHET et *al.*, 1962), nous n'avons pas obtenu de relation définie entre les quantités de potassium absorbées par les plantes et les concentrations des solutions du sol en cet élé-

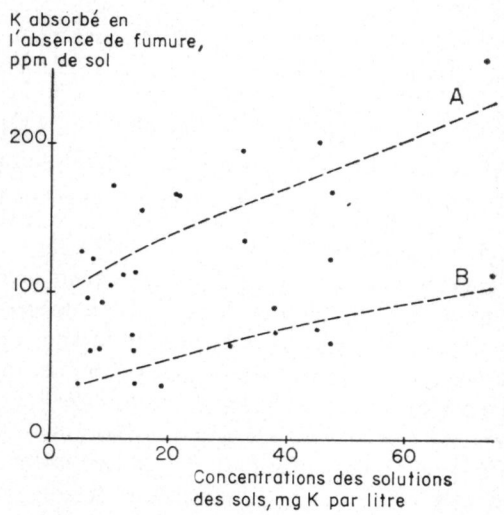


FIG. 7. — *Quantités de potassium absorbées, en l'absence de fumure potassique, en fonction des concentrations des solutions du sol*
A : Sols de fort pouvoir adsorbantl et possibilités de libération élevées.
B : Sols de pouvoir adsorbant faible.

ment. Les possibilités de renouvellement de celles-ci aux dépens des réserves adsorbées, d'une part, et de libération d'ions K^+ à partir des minéraux, d'autre part, paraissent exercer un effet beaucoup plus marqué que les concentrations mesurées à un instant donné.

On peut cependant remarquer que le degré d'utilisation des réserves, exprimé par exemple par le rapport [K absorbé/K échangeable final], est bien fonction du

pouvoir adsorbant des sols, comme l'indique la comparaison du graphique 2 et du tableau 4 : l'utilisation des réserves est d'autant plus poussée que le pouvoir adsorbant est plus faible, et inversement, Cet effet peut être dû à l'ampleur des mouvements d'ions K^+ par diffusion, qui sont vraisemblabmleent liés à la concentration des solutions du sol et au pouvoir adsorbant.

L'étude de l'influence de la température sur les équilibres sols-solutions, qui fournit une indication de l'énergie d'adsorption des ions K^+, n'a pas permis de mettre en évidence une relation nette entre les résultats obtenus et l'alimentation des plantes.

III. *Quelques exemples de résultats d'expérimentation en plein champ*

1° *Sol dépôts sur éocène* (*Sidérolithique*)

Il s'agit d'un sol sablo-limoneux lessivé, dont les principaux caractères de la couche arable sont les suivants :

Terre fine p. 100	99
Constituants, p. 100 de terre fine :	
Argile	14,3
Limon	31,8
Sable très fin 20-50 μ	22,8
Sable fin	13,7
Sable grossier	11,2
Matière organique	1,86
C/N	9,1
pH	6,5
P_2O_5 assimilable (JORET-HÉBERT) pouvoir adsorbant faible	0,05 °/oo
K_2O échangeable	0,05 °/oo

Argiles : kaolinite prédominante (sol n° 4 du tabl. 2)

En vases de végétation, ce sol a cédé assez facilement aux plantes les ions K^+ de ses réserves ou de la fumure apportée (sol n° 4 du tableau 4).

Depuis 1957, le Syndicat professionnel de l'Industrie des Engrais azotés a installé un essai de comparaison de diverses fumures : les principaux résultats relatifs au potassium sont reportés sur le tableau 5. Les fumures azotées et phosphatées sont choisies de telle sorte que N_1 soit inférieur aux besoins de la plante, et N_2 suffisant ; P_1 couvre les besoins de la culture, et P_2 est nettement renforcé.

Bien que ce sol soit très pauvre en potassium échangeable et présente une très forte réaction à la fumure potassique, on n'observe jusqu'en 1960 aucune action supplémentaire de la dose K_1 par rapport à la dose K_2. En 1961, la fumure potassique du ray-grass italien était insuffisante, même à la plus forte dose ; les exportations de la récolte ont en effet atteint pour les traitements NPK et $N_2P_2K_2$ respectivement 166 et 238 kg K_2O/ha. On constate alors, naturellement, un effet nettement supérieur de la dose K_2. Cet effet disparaît en 1962, où la production est moindre. En 1963, l'épuisement provoqué par le ray-grass conduit à un effondrement total des parcelles K_0, où le gel hivernal du blé s'est fait particulièrement sentir. La plus productive des deux variétés comparées réagit favorablement à la dose K_2, par rapport à K_1.

Deux observations essentielles nous paraissent découler de cet exemple :

— dans ce sol pauvre en argiles illitiques, où le pouvoir de fixation du potassium est faible, il n'est pas nécessaire de constituer des réserves potassiques importantes pour assurer une bonne alimentation des plantes ;

TABLEAU 5

Fumures potassiques et rendements obtenus, sol sur dépôts éocènes

Année	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	
Culture	Blé	Betteraves fourragères	Blé	Orge	Ray-Grass italien	Ray-Grass italien	Blé	
Fumures, kg K_2O/ha :								
K_1	80	90	80	60	118	120	120	
K_2	80	120	104	90	155	190	160	
Traitements	Rendements, qx/ha							
							2 variétés	
							Cappelle	*Champlein*
NP	31,3	815	44,6	28,1	53,5	30	2,5	2
NPK_1	40,8	943	51,6	34,2	61,4	34,4	47,6	48,3
N_2PK_1	45,4	988	52,3	40	67,8	51,1	44,5	44,2
$N_2P_2K_2$	44,9	924	51,9	39,6	78	48,3	45,9	55,2

— les fumures annuelles doivent être exactement appropriées aux besoins de la culture. Celle-ci ne peut en effet trouver dans la faible réserve, ou dans les minéraux du sol, de quoi satisfaire des besoins importants. Inversement, des fumures trop élevées risquent d'entraîner soit des lessivages, soit des consommations de luxe.

2° *Sol brun sur calcaire jurassique.*

Il s'agit d'un sol brun légèrement calcaire dont les principaux caractères sont les suivants :

Terre fine, p. 100	100
Constituants, p. 100 de terre fine :	
Argile	33,3
Limon	25
Sable très fin 20-50 μ	26,3
Sable fin	8,3
Sable grossier	4,7
CO_3Ca	0,6
Matière organique	2,47
C/N	7,9
pH	7,8
P_2O_5 assimilable (JORET-HÉBERT) pouvoir adsorbant fort	0,07 °/₀₀
K_2O échangeable	0,30 °/₀₀

Argiles : kaolinite et illite dominantes, un peu de chlorite (sol nº 6 du tabl. 2).

Les argiles illitiques de ce sol sont assez altérées : elles sont susceptibles de fixer une forte quantité de potassium (1,18 p. 100 du poids de l'argile) ; cette fixation d'ions K^+ conduit, au cours de la diffraction des rayons X, à l'apparition d'un pic 10 Å très bien caractérisé, alors qu'il se trouve assez « écrasé » sur l'échantillon non traité (graph. 8).

En vases de végétation, ce sol a manifesté une aptitude particulièrement faible à céder aux plantes ses réserves potassiques (sol nº 6 du tabl. 4). Les rapports [K absorbé/K échangeable en fin de culture], compris entre 0,52 et 0,58 (tabl. 4), sont les plus faibles parmi ceux que nous avons observés.

Pendant trois années, la Société commerciale des Potasses d'Alsace a effectué sur ce sol une expérimentation de fumures potassiques, comprenant notamment la comparaison d'un témoin sans K et d'une dose de 120 kg/ha K_2O pour le blé et 80 kg/ha pour l'orge. Les fumures azotées et phosphatées étaient copieuses. Les rendements obtenus sont indiqués au tableau 6.

TABLEAU 6

Fumures potassiques et rendements obtenus, sol brun calcaire

Année	Culture	Apport K_2O (kg/ha)	Rendements (qx/ha)
1960	Blé	0	45,8
		120	49,3
1961	Orge	0	31,2
		80	37,2
1962	Orge	0	27,9
		80	33,6

Bien que le sol soit relativement bien pourvu en potassium (0,30 p. 100 de K_2O échangeable), la réaction à la fumure potassique est très forte, et reflète l'alimentation défectueuse à partir des réserves du sol. Ce phénomène paraît bien lié aux argiles illitiques altérées.

3º *Cas intermédiaires.*

Les deux exemples ci-dessus ont été choisis assez extrêmes, le premier montrant une excellente utilisation de la fumure potassique dans un sol presque dépourvu de réserves, le second une très faible utilisation des réserves dans un sol où elles sont assez abondantes. De nombreux cas intermédiaires existent naturellement ; nous ne les détaillerons pas ici, les résultats obtenus par BARBIER et *al.* (1957), sur un sol de limon, les illustrant bien.

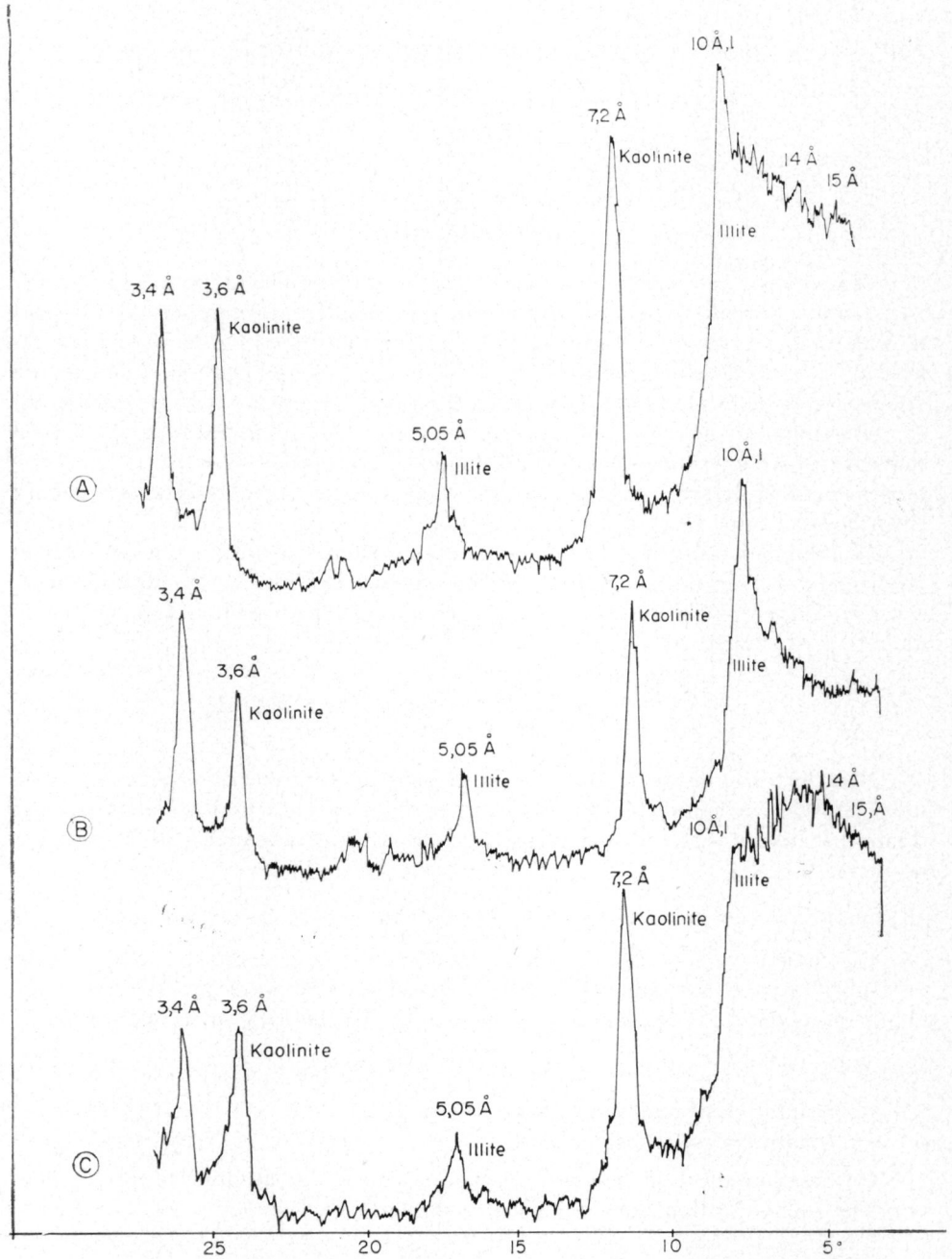


FIG. 8. — *Comparaison des diagrammes de diffraction des rayons X d'une argile, selon divers traitements A, B, C.*

A : Argile n'ayant subi aucun traitement :
Pic de l'illite à 10,1 Å peu net (réflexion basale 001).
Entre 10,4 Å et 14-15 Å. Zone à minéraux illitiques (illites altérées).

B : Argile traitée par ClK + ClNa (fixation de K^+).
Pic de l'illite à 10,1 Å très net (001).

Atténuation très sensible de la zone à minéraux illitiques entre 10,4 Å et 14-15 Å (reconstitution d'illite d'où renforcement du pic à 10,1 Å).

C : Argile traitée par le tétraphénylborate de Na (libération de K^+).
Disparition du pic de l'illite à 10,1 Å (001).
Renforcement très important de la zone à minéraux illitiques (altération de l'illite).

DISCUSSION

1° *Partage du potassium entre la plante et le sol, équilibre plante-sol.*

Ces notions, que nous avons déjà dégagées antérieurement (BLANCHET et *al.*, 1962), sont particulièrement nettes lorsque l'on considère les rapports [K absorbé/K échangeable en fin de culture]. Ces rapports expriment en effet la répartition des ions K^+, à la fin de la végétation, entre la plante et le sol. Malgré des fumures très différentes, dont la plus forte dose est souvent bien supérieure à la teneur initiale en potassium échangeable, les rapports [K absorbé/K échangeable final], varient souvent peu selon les divers traitements appliqués à un même sol (tabl. 4). Ils caractérisent ainsi le partage des ions K^+ qui s'effectue entre la plante et le sol, comme entre deux champs d'attraction opposés.

Ils expriment l'aptitude du sol à céder le potassium à la culture, que cet élément provienne des réserves échangeables ou de la fumure apportée. Cette aptitude varie considérablement selon les sols, et les argiles illitiques paraissent jouer à cet égard un rôle prédominant.

2° *Influence des argiles illitiques sur le partage du potassium échangeable entre la plante et le sol*

Nous examinerons cette influence en considérant les résultats obtenus en vases de végétation sur l'ensemble des sols étudiés, et en faisant appel à deux méthodes d'interprétation statistique : indices pondérés de covariation tendancielle, et rapports de corrélations.

a) *Indices pondérés de covariation tendancielle* (MORICE et CHARTIER, 1954).

Ces indices i de covariation permettent d'étudier le degré de liaison positif ou négatif entre deux variables x et y ; on considère d'abord le produit des écarts de chaque valeur par rapport à la moyenne de chacune des variables x et y :

$$(x - \bar{x})(y - \bar{y}) = c \text{ ou } d$$

c : résultat positif (concordance)
d : résultat négatif (discordance).

On calcule ensuite la somme algébrique du total des produits Sc et Sd, ainsi que leur somme arithmétique ; l'indice i est alors :

$$i = \frac{Sc - Sd}{Sc + Sd}.$$

Le signe et la valeur de cet indice (— 1 à + 1) indiquent le sens et le degré de liaison entre les deux variables.

Le tableau 7 montre les résultats obtenus pour divers couples de variables, en particulier les rapports [K absorbé/K échangeable], obtenus en fin de culture, et diverses caractéristiques des argiles et des sols. Les remarques suivantes se dégagent de ce tableau :

— La teneur en illite proprement dite (ou en mica) des sols étudiés est très liée à leur richesse globale en argile, comme l'indique également le graphique 3.

— Les proportions d'illite ont été déterminées principalement d'après le taux de potassium de l'argile, les pics de diffraction des rayons X correspondant à des feuillets d'une épaisseur de 10 Å, et plus indirectement d'après les surfaces et capacités d'échanges de cations. Il s'agit donc d'illite « vraie », répondant aux caractères

TABLEAU 7

Indices pondérés de covariation tendancielle, entre diverses variables

N°	Variables étudiées	Indice *i*
1	Argile % de sol et illite % de sol	+ 0,915
2	Argile % de sol et K % d'argile après fixation maximum	+ 0,991
3	Rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K éch. fin culture}}$ et argile % de sol	— 0,922
4	Rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K éch. fin culture}}$ et capacité d'échange de cations de la fraction minérale du sol	— 0,759
5	Rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K éch. fin culture}}$ et illite % de sol	— 0,808
6	Rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K éch. fin culture}}$ et montmorillonite % de sol	— 0,429
7	Rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K éch. fin culture}}$ et (illite + montmorillonite) % de sol	— 0,902
8	Rapports $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K éch. fin culture}}$ et K % d'argile après fixation maximum	— 0,964

habituels de ce minéral. En fait, dans les sols, on trouve auprès de celui-ci d'autres minéraux provenant d'une altération plus ou moins poussée des illites et micas (MILLOT, 1964), ayant en particulier perdu une partie de leur potassium de constitution, et dont la surface et l'épaisseur des feuillets tendent ainsi à augmenter. Une fraction de la montmorillonite dosée ici peut provenir de l'altération de l'illite ; celle-ci peut également donner naissance, dans d'autres conditions, à des argiles se rattachant à la vermiculite.

L'ensemble des argiles illitiques, possédant à l'égard du potassium un pouvoir de fixation élevé, est donc plus vaste que l'illite proprement dite. Ces minéraux intermédiaires sont malheureusement bien difficiles à caractériser exactement ; par diffraction des rayons X, ils provoquent l'apparition, entre 10 et 14 Å, d'une intensité diffractée élevée (graph. 8).

Nous avons tenté d'étudier globalement l'influence de l'ensemble des argiles illitiques, en considérant leur teneur en potassium total après fixation maximum, dans les conditions indiquées ci-dessus (méthodes et techniques). Cette valeur représente la somme de deux termes :

a) Teneur en K de l'argile n'ayant subi aucun traitement ;

b) Quantité de K fixée au cours des contacts successifs avec le mélange ClK + Cl_2Ca.

Le tableau 7 montre qu'elle est très étroitement liée aux taux d'argile de ces diverses terres (relation 2).

— Sur le même tableau, on peut remarquer que les rapports [K absorbé /K échangeable] obtenus en fin de culture sont en relation étroite avec la teneur des sols en argile (relation 3), mais beaucoup moins liés à la capacité d'échange de cations de la fraction argileuse (relation 4). Si l'argile a joué un rôle important dans l'alimentation potassique, c'est donc beaucoup moins par des propriétés d'échange de cations que par d'autres caractères, vraisemblablement dus à la nature de certains minéraux argileux.

— L'influence des diverses argiles sur le partage entre la plante et le sol de l'ensemble des ions K^+ initialement échangeables ou apportés par la fumure est examinée dans les relations 5 à 8 (tabl. 7). On constate une influence faible de la teneur en montmorillonite, bien que celle-ci ne soit vraisemblablement pas toujours très typique. La liaison avec la proportion d'illite est plus étroite ; elle est un peu améliorée si l'on considère la somme [illite + montmorillonite]. Enfin, la relation la plus directe apparaît avec la teneur en potassium de l'argile après fixation maximum de cet élément, c'est-à-dire avec l'ensemble des argiles illitiques. Celles-ci constituent donc bien le facteur prédominant du partage des ions K^+ entre la plante et le sol.

b) *Rapports de corrélations*

La même conclusion apparaît en considérant les rapports de corrélations. La variation des rapports [K absorbé/K échangeable en fin de culture], en fonction des caractères du sol ou de l'argile, n'étant pas linéaire (graph. 6), le calcul des coefficients de corrélation ne présente pas de signification. Il est, par contre, possible de considérer le rapport de corrélations n, applicable à une relation d'allure curviligne (VESSEREAU, 1960) ; ce mode de calcul consiste en fait à partager la courbe représentative du phénomène en petits fragments pouvant être considérés come linéaires, puis à dégager la corrélation d'ensemble.

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

Rapport $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K échangeable fin culture}}$ et teneur des sols en argile : $n = 0{,}761$.

Rapport $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K échangeable fin culture}}$ et teneur des sols en illite proprement dite : $n = 0{,}737$.

Rapport $\frac{\text{K absorbé}}{\text{K échangeable fin culture}}$ et K % d'argile après fixation maximum : $n = 0{,}801$.

Ces trois valeurs sont largement significatives au seuil de probabilité 0,01, et confirment l'interprétation des indices de covariation tendancielle. On observe en effet des corrélations croissantes dans l'ordre : illite proprement dite — argile — ensemble des argiles illitiques, indiquant que le partage des ions K^+ entre la plante et le sol est principalement sous la dépendance de l'ensemble des argiles illitiques.

3° *Applications à la fertilisation*

De ces diverses études, il se dégage que, du point de vue de la fertilisation, les sols doivent être conduits de manières très différentes, selon leur constitution et leurs propriétés :

a) *Il ne paraît pas nécessaire de constituer dans les terres pauvres en minéraux illitiques, cédant facilement les ions K^+, des réserves importantes.*

Celles-ci seraient d'ailleurs difficiles à réaliser, car il est bien probable que des fumures potassiques très supérieures aux besoins des plantes conduiraient à des consommations de luxe et à des pertes par lessivage (PÉRIGAUD et BLANCHET, 1963).

Dans ces mêmes sols, la fumure doit, par contre, être très bien adaptée aux besoins de la culture, en particulier être suffisante lorsque celle-ci possède des exigences importantes (prairies temporaires, plantes sarclées...). Sinon, on court le risque de mal assurer l'alimentation potassique, et de limiter ainsi les rendements (cf. ci-dessus, sol sur dépôts éocènes).

Ces terres ne peuvent être considérées, du point de vue potassique, comme « mauvaises », sans réserves... ; le fait qu'il ne soit pas nécessaire de constituer un investissement sous forme de réserves potassiques nous paraît plutôt un avantage, à la condition que la fumure soit bien conduite.

b) *A l'opposé, les sols renfermant des quantités importantes de minéraux illitiques,* souvent assez bien pourvus en potassium échangeable, ne doivent être considérés comme riches qu'avec beaucoup de circonspection, car ils cèdent beaucoup plus difficilement leurs ions K^+ aux plantes. La fumure ne doit pas être négligée sans expérimentation préalable, en particulier sur les cultures les plus exigeantes. Son application peut cependant être beaucoup plus souple, et il convient sans doute de s'attacher plutôt au bilan du potassium qu'à la coïncidence très exacte des apports et des besoins.

Compte tenu du fort « pouvoir tampon » de ces sols à l'égard des ions K^+, de faibles fumures peuvent, au cours d'expérimentations, s'avérer sans effet significatif sur les rendements. Il est nécessaire d'expérimenter en présence de doses suffisantes d'engrais (par exemple, 100 kg/ha K_2O au moins sur céréales).

c) *Entre ces deux cas extrêmes, nous trouvons naturellement tout l'ensemble des sols de constitution moyenne,*

dont l'exemple peut être pris dans les sols de limon du Bassin parisien (BARBIER et *al*, 1957). Les normes habituelles de richesse et de fertilisation peuvent alors être utilisées, mais il serait à notre avis imprudent de les extrapoler aux cas précédents.

d) *Les sols formés en climat tempéré sur roches-mères riches en minéraux potassiques facilement altérables, par exemple en biotite,*

présentent un cas assez particulier (sols sur granites, micaschistes, certains gneiss...). Quoique ces terres ne soient souvent pas très riches en potassium échangeable, elles sont parfois susceptibles de régénérer rapidement les réserves au fur

et à mesure de leur utilisation par les cultures. Il semble difficile d'établir à ce sujet des régles générales ; chaque type demande sans doute à la fois une étude minéralogique et des expérimentations de durée suffisante.

4° *Diagnostic des argiles illitiques*

Celles-ci jouant dans beaucoup de cas un rôle essentiel dans l'alimentation potassique, il convient de pouvoir repérer aussi facilement que possible leur présence et leur abondance. Malheureusement, les techniques d'étude sont longues et laborieuses (CAILLÈRE et HÉNIN, 1963). Il semble d'ailleurs insuffisant de caractériser l'illite proprement dite, puisque c'est l'ensemble des minéraux illitiques qui intervient dans l'alimentation potassique. En dehors d'une étude détaillée de la fraction argileuse, quelques tests simples peuvent être très utiles :

— Les deux indices de fixation de VAN DER MAREL et VENEKAMP (1955), par voies sèche et humide, fournissent une bonne indication du comportement des ions K^+ dans le sol. Il n'est pas rare de rencontrer des terres riches en potassium échangeable, possédant cependant un pouvoir de fixation élevé ; la conjonction de ces deux caractères peut laisser supposer une certaine abondance d'argiles illitiques.

— Bien que nous n'en ayons pas expliqué le mécanisme, qui est sans doute très complexe, il s'avère que la comparaison du déplacement des ions K^+ par les ions Ca^{++} et NH_4^+, au cours de la percolation des sols par les acétates neutres de ces deux cations, fournit également une bonne indication de l'abondance des argiles illitiques (BLANCHET et *al*, 1962). Le tableau 4 donne quelques exemples de ces observations.

CONCLUSIONS

Les relations entre l'alimentation potassique des plantes, et les proportions et la nature de l'argile dans les sols, sont diverses et complexes. Sur l'ensemble des terres que nous avons examinées, teneur en argile et nature de celle-ci sont d'ailleurs liées, reflétant l'action des processus pédologiques.

Globalement, l'alimentation potassique se présente le plus souvent sous l'aspect d'un équilibre dynamique, d'un partage des ions K^+ entre la plante et le sol, fonction à la fois des besoins de la plante et des caractères du sol et de l'argile. Parmi ceux-ci, les propriétés physico-chimiques classiques des minéraux argileux, telles que capacité d'échange de cations, énergie d'adsorption des ions K^+, concentration des solutions du sol, ne semblent pas exercer une influence déterminante sur l'alimentation. Celle-ci apparaît surtout sous la dépendance de l'ensemble des argiles illitiques ; bien que la raison n'en apparaisse pas clairement, plusieurs mécanismes peuvent être supposés :

— Ces minéraux conditionnent l'essentiel des phénomènes de rétrogradation et de libération d'ions K^+, dont l'effet sur l'alimentation est certainement important.

— Dans les minéraux illitiques, les mouvements d'ions K^+ sont souvent plus ents que chez les autres argiles (BLANCHET et *al*, 1962), et il est possible que les

processus de diffusion permettant les flux d'ions du sol vers la plante s'en trouvent ralentis.

— Enfin, il n'est pas exclu que les argiles illitiques, plus ou moins altérées, ne manifestent pas à l'égard des ions K^+ considérés comme échangeables une affinité plus grande que les autres argiles. Les sols « illitiques » que nous avons étudiés possèdent manifestement un pouvoir adsorbant particulièrement élevé à l'égard du potassium (graph. 2) ; la notion de potassium échangeable est d'ailleurs dans ce cas assez floue, les résultats obtenus dépendant beaucoup des conditions expérimentales.

Ces observations conduisent à envisager la fertilisation de manière à bien l'adapter à chaque type de sols. Une réserve importante n'est pas nécessaire dans ceux qui cèdent facilement leurs ions K^+ ; il est d'ailleurs probable que de tels sols s'avèreraient difficiles à enrichir, en raison de leurs faibles propriétés de rétention. La fumure doit par contre y être très bien adaptée aux besoins de la culture. Les terres riches en argiles illitiques, au contraire, possèdent des réserves importantes même lorsqu'elles n'ont reçu que des fumures potassiques très faibles ; c'est un signe manifeste de leur rétention assez énergique du potassium. Cette abondance de réserves ne signifie pas toujours que les plantes soient bien alimentées ; si la fumure peut être plus souple, elle ne doit être négligée que si l'expérimentation n'a pas prouvé son utilité, au cours d'un nombre d'années suffisant.

Plus que les simples teneurs du sol en potassium échangeable et en argile, il convient donc de considérer la nature de celle-ci, en tâchant de prévoir le comportement du sol à l'égard de la plante, comportement qui revêt des aspects extrêmement différents.

Reçu pour publication en avril 1965.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les techniciens et les organismes qui ont bien voulu nous faire part de leurs observations et des résultats de leurs expérimentations, en particulier la Société Commerciale des Potasses d'Alsace et le Syndicat professionnel de l'Industrie des Engrais azotés.

SUMMARY

THE PREDOMINANT EFFECT OF ILLITIC CLAYS
ON THE POTASSIUM NUTRITION OF PLANTS IN DIFFERENT SOIL TYPES

On soils of different types subject to field experiments with potash fertilizers, studies were made of the :

— nature of clays (chemical analysis, X ray diffraction, cation exchange capacity, adsorbing surface, potassium fixing capacity) ;

— soil-solution equilibria, and fixation and release of K^+ ions ;

— absorption of potassium by barley in pot experiments involving different treatments (0,50 or 300 p.p.m. K).

Results of pot experiments agreed well with those of field trials. They show a sort of equilibrium, a sharing of exchangeable K^+ ions between the plant and soil, depending mainly on the adsorption power of soil and on the illitic clay content (illite proper and weathered illitic minerals capable of fixing potassium). This effect of illitic clays is rather specific ; it is associated with the movement of ions in these clays rather than effected by the intermediary of cation-exchange capacity.

Consequences of these facts in respect of fertilizing are discussed, namely :

— uselesness of high reserves in soils in which potassium nutrition proceeds with ease, but use of fertilizers well adapted to the crops ;

— average cases where the usual practices may be applied ; and

— special problems of soils rich in illitic clays or in minerals that release potassium during their weathering.

ZUSAMMENFASSUNG

DER VORHERRSCHENDE EINFLUSS ILLITISCHER TONE AUF DIE KALIERNÄHRUNG DER PFLANZEN AUF VERSCHIEDENEN BODENTYPEN

Verschiedene Bodentypen, die meisten mit Feldversuchen für Kalidüngung, wurden folgendem Studium unterworfen :

— Bestimmung der Tone (chemische Untersuchung, Diffraktion der Roentgenstrahlen, Kationenaustauschvermögen, Adsorptionsflächen, Kalifestlegungsvermögen).

— Gleichgewicht Boden-Lösungen ; Festlegung und Freilegung der K + — Ionen.

— Vergleichende Prüfung der Kali-Adsorption durch Gerste in Vegetationsgefässen, bei sehr verschiedener Düngung (0,50, 300 p.p.m. K).

Die in Gefässen gewonnenen Resultate stimmen gut mit den Feldbeobachtungen überein. Sie zeigen eine Art Gleichgewicht, eine Teilung austauschbarer K^+-Ionen zwischen Pflanze und Boden. Diese Teilung wird grösstenteils vom Adsorptionsvermögen des Bodens und von seinem Gehalt an illitischem Ton bestimmt (Illite und verwitterte illitische Minerale die K binden können). Dieser Einfluss der illitischen Tone ist ziemlich spezifisch ; er wirkt nicht durch das Kationenaustauschvermögen, eher scheint er an die Bewegungen der Ionen in den Tonen gebunden zu sein.

Die Folgen dieser Tatsachen, die Düngung betreffend, werden einer Diskussion unterzogen :

— Wichtige Reserven sind überflüssig in Böden, in denen die Kaliernährung gut erfolgt ; die Düngung muss den Kulturen angepasst werden.

— Mittlere Fälle : hier können die gewöhnlichen Normen angewandt werden.

— Böden reich an illitischen Tonen oder Mineralien, die während ihrer Verwitterung Kali freigeben, sind Sonderfälle.

Преобладающее влияние иллитных глин на калиевое питание растений в разных типах почв.

Р. БЛАНШЭ, Ж. ГЮИЙО, Ж. ШОССИДОН, Ж. КРУЗЭ, К. ШОМОН.

РЕЗЮМЕ

Самые разнообразные типы почв, большая часть которых была уже испробована в полевых экспериментах с калиевыми удобрениями, подверглись исследованиям следующего порядка :

— Определение природы глин (химический анализ, диффракция лучей X, емкость обмена катионами, адсорбционная поверхность, способность фиксировать калий).

— Отношение почва/раствор; фиксация и освобождение ионов K^+.

— Сравнительное изучение сорбции калия культурой ячменя в вегетационных вазах в присутствии разнообразных удобрений (0; 50; 300 °/₀₀ K).

Результаты опытов в вазах согласуются с результатами наблюдений в поле. Они выявляют некоторого рода равномерность раздела обменных ионов K^+ между растением и почвой. Раздел этот зависит главным образом от адсорбционной мощности почвы и от количества содержащихся в ней иллитных глин (чистый иллит и выветрившиеся иллитные минералы способные фиксировать калий). Это влияние иллитных глин довольно специфично; оно не производит своего действия при помощи емкости обмена, а скорее связано с передвижениями в них катионов.

Следует дискуссия о последствиях этих фактов в отношении плодородия :

— Об отсутствии необходимости крупных запасов в почвах с легко осуществляющимся калиевым питанием, а скорее подкормок приспособленных к роду культуры.

— О возможности применить, или эти средства, или обычные нормы.

— Особо выделен вопрос почв почв богатых иллитными глинами, или минералами освобождающими калий при выветривании.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOLD P. W., 1962. The potassium status of some english soils considered as a problem of energy relationships. *The Fertiliser Society, London, Proc.* **72**, 25-55.

AUDIDIER L., GARAUDEAUX J., CHEVALIER H., 1962. Bilan du K échangeable et bilan total du K dans divers sols. *Ass. Inters. Sci. Sol, Comm. II-IV*, Wellington, en cours d'impression.

BARBIER G., TENDILLE C., TROCME S., 1957. Expérience culturale de onze années sur la fumure potassique. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **43**, 256-261.

BLANCHET R., 1959. Énergie d'adsorption des ions minéraux par les colloïdes du sol et nutrition minérale des plantes. *Ann. agron.*, **10**, 5-52, 125-153 et 267-307.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1962. Propriétés physico-chimiques des sols et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **13**, 175-201.

BOWER C. A., GOERTZEN J. O., 1959. Surface area of soils and clays by an equilibrium ethylene glycol method. *Soil Sci.*, **87**, 289-292.

CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1963. *Minéralogie des argiles.* 355 p., Masson, Paris.

CHAMINADE R., 1960. Expérimentation en petits vases de végétation. *Ann. agron.*, **11**, 121-134.

CHAUSSIDON J., 1961. *Étude de l'environnement ionique et des propriétés électrochimiques de surface de particules d'argile en suspension.* Thèse Doct., Paris, nº 4528, 118 p.

DEMOLON A., BARBIER G., 1930. Contribution à l'étude de l'évolution des phosphates solubles dans les sols minéraux. *Ann. Sci. agron.*, **3**, 329-363.

DYAL R. S., HENDRICKS S. B., 1950. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, **69**, 421-432.

FRANC DE FERRIÈRE J. J., BLANCHET R., MILLOT G., CAMEZ T., 1960. Influence de la nature des argiles sur la dynamique du potassium dans les sols de quelques champs d'essais. *Ann. agron.*, **11**, 163-175.

GRIM R. E., 1953. *Clay mineralogy.* 384 p., Mc Graw Hill Book Comp., New York.

JACKSON M. L., 1958. *Soil chemical analysis.* Prentice Hall, Englewod Cliffs, N. J., USA, 272-291.

MILLOT G., 1964. *Géologie des argiles.* Masson, Paris, 352-412.

MORICE E., CHARTIER F., 1954. Méthode statistique. *Inst. Nat. Stat. Ét. écon., Paris*, 742 p.

MORTLAND M. M., 1958. Kinetics of potassium release from biotite. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **22**, 503-508.

NADEAU J. C., 1961. Évaluation de la proportion et de la nature des réseaux expansibles dans un mélange d'argiles. *C. R. Acad. Sci.*, **253**, 162-164.

PÉRIGAUD S., 1963. Contribution agronomique à la mise en valeur de la Brenne. *Ann. agron.*, **14**, 121-194 et 261-377.

PÉRIGAUD S., BLANCHET R., 1963. L'enrichissement chimique des sols de Brenne. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **49**, 256-263.

SCHUFFELEN A. C., VAN DER MAREL H. W., 1955. Potassium fixation in soils. In *Potassium Symposium, Institut International de la Potasse, Berne*, 157-201.

SCOTT A. D., REED M. G., 1960. Determination of precipitated potassium in sodium tetraphenylboron ; micaceous mineral systems. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **24**, 326-327.

SCOTT A. D., REED M. G., 1962. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solutions containing sodium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **26**, 41-48.

SCOTT A.D., REED M. G., 1962. Chemical extraction of potassium from soils and micaceous minerals with solutions containing sodium tetraphenylboron. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.* **26**, 41-48.

STRASMAN A., QUIDET P., BLANCHET R., 1958. Dynamique du potassium dans le sol et alimentation potassique des plantes. *Ann. agron.*, **10**, 635-658.

STUDER R., BLANCHET R., 1962. Les terroirs du Berry, principaux types de sols et problèmes agronomiques. *Bull. Ass. Franc. Ét. Sol*, **2**, 65-104.

VAN DER MAREL H. W., VENEKAMP. J. I. N., 1955. Potassium fixation in the dutch soils. *Versl. Landbouwk. Anderzoehn*, **61**, 1-61.

VAN DER PAAUW F., 1956. Calibration of soil-test methods for the determination of phosphate and potash status. *Plant and Soil*, **8**, 105-125.

VESSEREAU A., 1960. *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie.* Baillière, Paris, 485-491.

WOODRUFF C. M., MAC INTOSH J. L., 1960. Testing soil for potassium. *7th Intern. Congress Soil Sci.*, Madison, **3**, 80-85.

Ann. agron., 1965, **16** (2), 203-221.

ESSAI D'INTERPRÉTATION DE L'UTILISATION DE L'AZOTE PAR UNE PRAIRIE TEMPORAIRE (FÉTUQUE DES PRÉS). CONSÉQUENCES POUR LA FUMURE.

G. LEFÈVRE, G. HIROUX, Mlle CAILLOUET (1)

Station d'Agronomie, Amiens (Somme).

SOMMAIRE

Les résultats de trois années d'essais de fumure azotée sur Fétuque ont été utilisés pour essayer de suivre le mode d'utilisation de l'azote et d'évaluer, selon la réponse du végétal, les possibilités de mises en réserves ou au contraire d'arrière-actions.

I. — INTRODUCTION

La fumure azotée minérale est, généralement, destinée à compléter la fourniture en azote du sol. Le complément qu'elle représente permet de faire face à des besoins importants, correspondant à une phase déterminée du développement végétal, et d'entretenir les réserves du sol.

Dans le cas de cultures annuelles, la quantité d'azote minéral libérée par le sol dépend de l'entretien organique général et à l'intérieur de celui-ci, de la place dans la rotation ou de l'antécédent immédiat. Cette double action est plus ou moins difficile à évaluer.

Dans le cas de cultures pérennes, prairies ou cultures d'herbes par exemple, les deux facteurs se superposent. Le problème est cependant déplacé par la mise en réserve d'une partie de l'azote mis en jeu. On peut toutefois établir assez facilement un bilan apparent entre l'azote apporté par la fumure et l'azote exporté par les parties aériennes.

Nous avons essayé d'utiliser les observations recueillies pendant plusieurs années avec une fétuque des prés (variété : *Naïade*) pour faire un tel bilan et étudier le « rendement » de l'azote apporté.

(1) Nous remercions de leur concours, M. VASSE, Conseiller de la Chambre d'Agriculture et M. DELESPIERRE, exploitant.

II. — CONDITIONS GÉNÉRALES DES ESSAIS

Restant sur une même pâture, semée en 1959, nous utiliserons les résultats obtenus au cours des années 1961, 1962, 1963. L'éventail des doses de fumure azotée et surtout leur répartition dans le temps ont été très variables. Le schéma d'emploi pour 1961 a déjà été publié (LEFÈVRE et HIROUX, 1962). Celui des années 1962 et 1963 est une variante de celui de 1961 mais a été appliqué aux mêmes parcelles pour ces deux années.

L'entretien phosphopotassique a été réalisé de la façon suivante :

En 1961, une fumure de fonds apportant 100 unités de chaque élément. Puis, pour la moitié des parcelles, une fumure fournissant 50 unités de P_2O_5 et 80 unités de K_2O, avant chaque cycle (c'est-à-dire après chaque coupe).

En 1962, et 1963 pas de fumure de fonds. Mais pour la moitié des parcelles une fumure fournissant 25 unités (P_2O_5) et 40 unités (K_2O) avant chaque cycle de 1962, et 25 unités (P_2O_5) et 80 unités (K_2O) avant chaque cycle de 1963.

L'ensemble des parcelles peut donc être divisé en deux. Une partie recevant une fumure phosphopotassique avant chaque cycle de végétation, l'autre partie ayant eu seulement une fumure de fonds au cours de l'hiver précédent en 1961 ou n'ayant rien reçu en 1962 et 1963. Nous les désignerons par la suite sous le terme de « avec PK » et « sans PK ».

L'ensemble de ces variations de la fumure est résumé dans le tableau suivant :

	1961	1962	1963	
Éventail de la fumure azotée annuelle	40	0	0	160
	70	40	40	180
	100	80	60	200
		120	100	
			120	

	1961	1962	1963
Nombre de traitements azotés différenciés par les doses et la chronologie des apports	16	16	16
Fumure phosphatée totale annuelle	100	0	0
ou	350	75	75
Fumure potassique totale annuelle	100	0	0
ou	500	120	240
Nombre de coupes	5	3	3

Les mesures d'exportation d'azote ont été faites sur les parties aériennes, récoltées par fauche, suivant un rythme « pâture ».

III. — ESSAI DE CORRÉLATION ENTRE L'AZOTE, EXPORTÉ PAR LES PARTIES AÉRIENNES AU COURS D'UNE ANNÉE, ET L'AZOTE APPORTÉ

Si l'on reporte sur graphique (graph. 1 « sans PK », graph. 2 « avec PK ») la quantité d'azote exportée *annuellement* par les parties aériennes, en fonction des quantités d'azote minéral fournies par la fumure, on obtient des points dont la disposition autorise à rechercher une corrélation entre ces deux valeurs.

Le calcul des droites de régression suivant les années et les traitements phosphopotassiques, donne les résultats suivants :

	Sans PK	*Avec PK*
1961 :	$Y = 0.749\ x + 100$	$Y = 0.549\ x + 156$
1962 :	$Y = 0.588\ x + 50$	$Y = 0.516\ x + 53$
1963 :	$Y = 0.638\ x + 86$	$Y = 0.545\ x + 98$

Y = quantité d'azote exportée, en un an, par les parties aériennes, en kg /ha
x = quantité d'azote apportée par la fumure minérale en kg /ha.
Le facteur indépendant de ces droites, représente, pour chaque année, la quan-

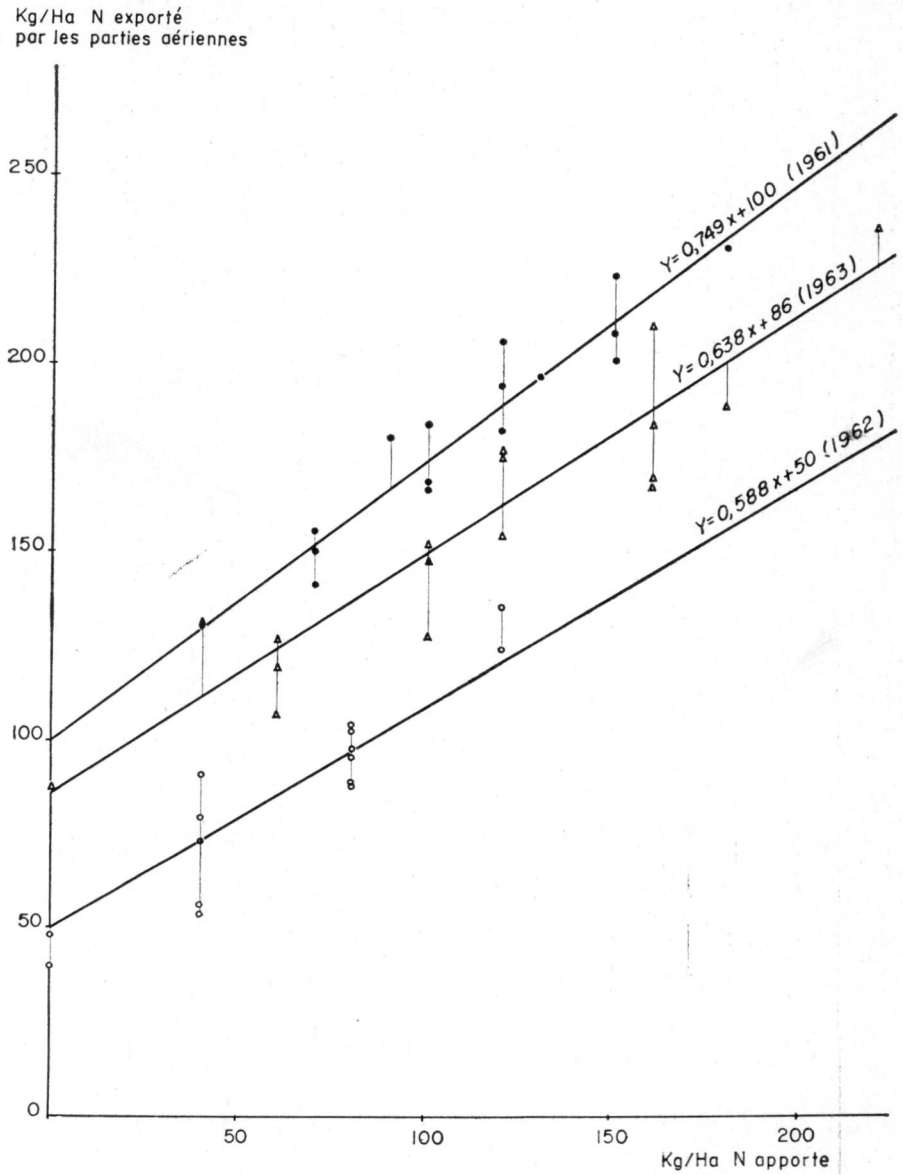


FIG. 1. — *Quantités d'azote exportées par les parties aériennes en fonction des quantités d'azote apportées*
(Sans PK)

tité d'azote exportée par le témoin. La variation de ce chiffre rend compte de la variabilité de la minéralisation et de l'utilisation de l'azote du sol suivant les années. On peut noter également l'influence de la fumure « PK » sur cette valeur.

Le coefficient de x représente le pourcentage de l'azote fourni par l'engrais, exporté par les parties aériennes. En l'absence d'un complément phosphopotassique, sa variation (de 58,8 p. 100 à 74,9 p. 100) est importante, tandis qu'avec ce complément, sa valeur est à la fois plus faible et plus constante (51,6 p. 100 à 54,9 p. 100).

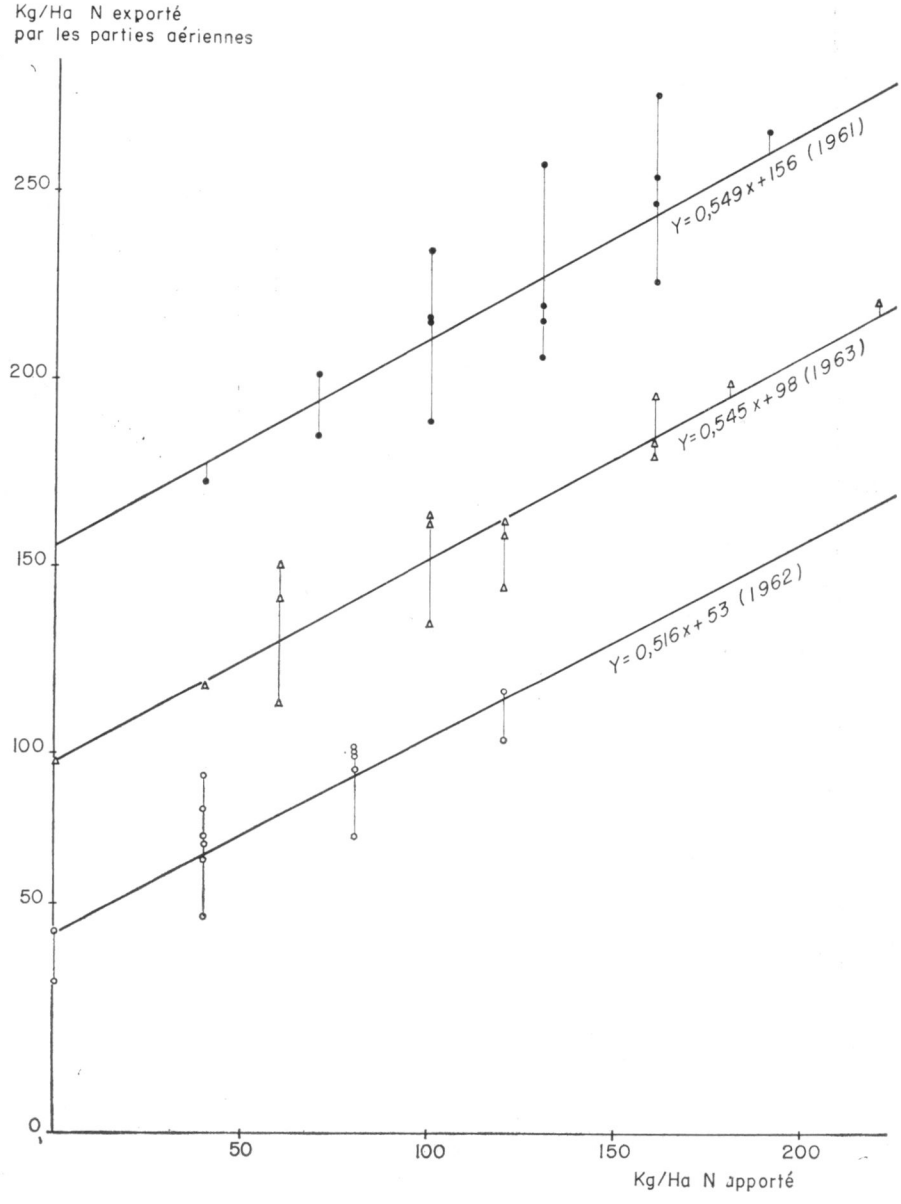


FIG. 2. — *Quantités d'azote exportées par les parties aériennes en fonction des quantités d'azote apportées*
(Avec PK)

La fumure phosphopotassique échelonnée permet donc, à la fois, une meilleure minéralisation du témoin, comme nous venons de le voir plus haut, et régularise, à un niveau inférieur, le degré d'utilisation de l'azote complémentaire.

IV. — DISCUSSION DES DONNÉES PRÉCÉDENTES

Pour discuter de la signification de ces droites, nous raisonnerons sur une droite moyenne dont le coefficient de x sera la moyenne des coefficients obtenus avec les parcelles PK, soit approximativement 0,54.

La droite a donc pour équation :

$$Y = 0{,}54\ x + T$$

T = exportation par le témoin, sans apport extérieur d'azote.

Pour tracer la droite, nous prendrons une exportation, moyenne des trois ans, de 100 kg (graph. 3) (T = 100).

Traçons la première bissectrice. Elle représente les points pour lesquels les exportations seraient égales aux apports.

Elle coupe la droite précédente en un point A, tel que :

$$0{,}54\ xA + T = xA$$

où $xA = \dfrac{T}{0{,}46} = 2{,}17\ T$ (si T = 100, x = 217 kg).

Pour cette valeur de x, la quantité d'azote apportée par la fumure minérale est apparemment entièrement exportée par les parties aériennes. Elle représente la valeur pour laquelle le sol, ou la partie souterraine, est en équilibre au point de vue de l'azote.

A gauche du point A, les exportations sont supérieures aux apports et l'espace du plan compris entre la droite des exportations et la première bissectrice représente, en fonction de l'apport, la part apparente fournie par le sol. Le graphique 3 montre que cette part irait en diminuant lorsque les apports extérieurs augmentent.

GADET (1962) a, certes, montré que la minéralisation de l'azote du sol pouvait être diminuée par une fumure minérale, mais cette diminution ne dépasse pas 10 p. 100 de la quantité libérée en l'absence d'engrais. Nous avons plutôt pensé que la partie de l'azote apportée, non mesurée dans les parties aériennes, devait se retrouver dans le sol, soit dans les racines et dans leurs réserves, soit sous forme microbienne dans la rhizosphère. Avec les quantités employées dans nos essais, on ne peut déceler un résidu de fumure sous forme minérale. Il serait, alors, logique d'attribuer à cet azote restant dans le sol, une valeur proportionnelle aux exportations aériennes, et cette proposition est confirmée par la droite de régression, qui indique en effet que les exportations aériennes ne représentent que 54 p. 100 des apports, quelle que soit leur valeur. Cela doit encore s'appliquer quand les apports sont nuls et l'exportation du témoin ne représente donc que 54 p. 100 de l'azote mis en œuvre, qui est alors de $\dfrac{T}{0{,}54} = 1{,}85\ T$.

La quantité d'azote mise en jeu dans l'ensemble de l'essai est alors représentée par la droite : $Z = 1{,}85\ T + x$ ou $= 1{,}85\ Y$.

Cette droite Z représente la quantité d'azote dont la plante devait disposer pour que l'on en retrouve 54 p. 100 dans les parties aériennes.

La portion de plan comprise entre elle et la droite des exportations, constitue la quantité d'azote restant dans les parties souterraines ou dans le sol.

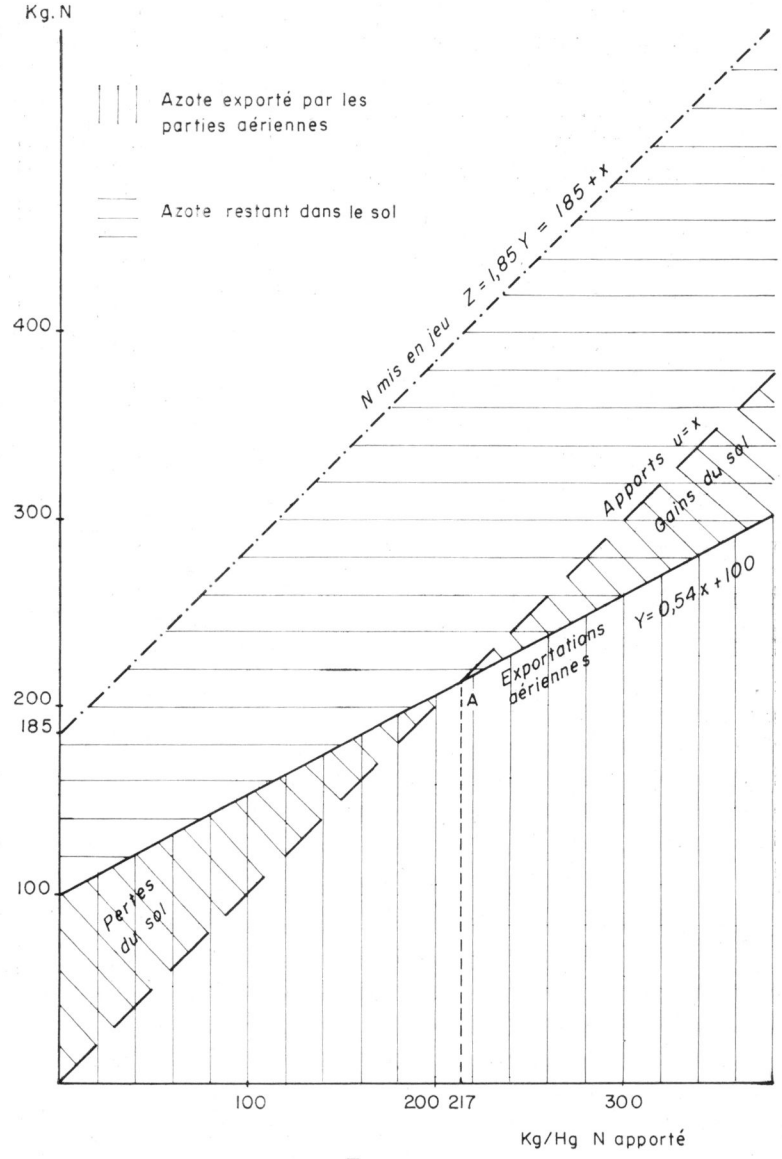


FIG. 3. —

On voit alors, comment, la part minéralisée par le sol étant supposée constante, le sol peut s'enrichir lorsque les apports sont supérieurs à ceux correspondant au point A.

Nous avons vu qu'en présence d'une fumure phosphopotassique convenable, la pente de la droite des exportations aériennes est peu variable.

En prenant donc la valeur moyenne de 0,54, l'abscisse du point A est, nous l'avons vu, $xA = 2{,}17$ T. Elle dépend alors principalement de la quantité d'azote exportée par le témoin.

Si l'on revient aux valeurs réelles, fournies par les exportations des essais P-K, et aux équations correspondantes, on trouve les valeurs suivantes pour xA :

En 1961, exportation du témoin	156	$xA = 347$ kg/ha
1962, exportation du témoin	53	$xA = 110$ kg/ha
1963, exportation du témoin	98	$xA = 215$ kg/ha

Ces valeurs varient, pour les trois années, dans les proportions de 1, 2 et 3. Elles dépendent de la productivité du témoin. Rappelons que ces résultats ont été obtenus sur des parties différentes d'une même pâture, donc avec le même sol, les mêmes plantes, etc. La variable importante était introduite par les conditions climatiques.

On retrouve, ainsi, que la fumure azotée peut être d'autant plus élevée que le potentiel du témoin est, lui-même, plus important. Ceci se justifie si l'on considère que l'on doit compenser les prélèvements faits sur les réserves du sol et se vérifie encore en considérant les équations de la page 204. Le coefficient d'exportation (coefficient de x) est en effet, pour un entretien PK déterminé, d'autant plus élevé que l'exportation du témoin est, elle-même, plus élevée.

Sans PK		*Avec PK*	
Coefficient de x	Exportation du témoin	Coefficient de x	Exportation du témoin
0,588	50	0,516	53
0,638	86	0,545	98
0,749	100	0,549	156

Ces observations montrent, également, qu'une culture de graminées, comme la fétuque, ne conduit pas forcément à un enrichissement du sol en azote (et par voie de conséquence en matières organiques) comme on aurait tendance à le croire, en extrapolant le comportement des prairies pâturées. L'enrichissement de ces dernières ne peut s'expliquer que par une restitution importante, réalisée par les bêtes en pâturage, diminuant ainsi les exportations qui peuvent, alors, être plus que compensées par la fixation d'azote des légumineuses. La transposition d'une prairie recevant peu d'engrais et riche en légumineuses, à une culture de graminées, demande des apports d'azote d'autant plus élevés que la part prise par la production de foin ou d'ensilage est plus élevée.

V. — COMPORTEMENT INDIVIDUEL PAR COUPE INFLUENCE DE LA RÉPARTITION DES FUMURES

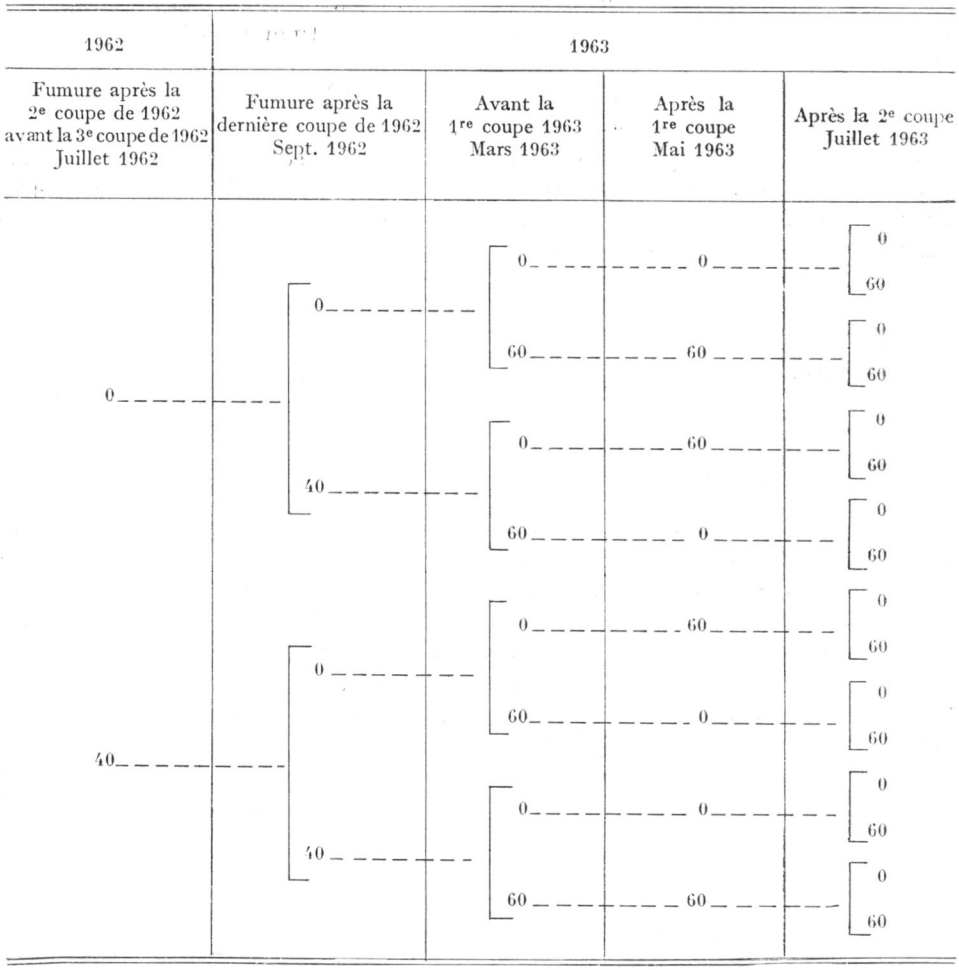
Les droites précédentes mettent en évidence un comportement moyen annuel de la graminée, se traduisant par une exportation par les parties aériennes, d'un peu plus de la moitié de l'azote fourni. Elles indiquent en même temps, les besoins de l'ensemble souterrain (racines, sol, rhizosphère, résidus végétaux...).

Il pouvait être intéressant de comparer ce prélèvement moyen à celui de chacun des cycles de végétation, en vue de rechercher si l'on pouvait repérer ainsi les périodes où la plante prélèverait, soit une part plus importante de l'azote fourni, pour créer des racines ou constituer des réserves, soit, au contraire, utiliserait de l'azote stocké au préalable.

L'échelonnement de la fumure pourrait, d'autre part, expliquer certains écarts relevés par rapport à la courbe moyenne.

Nous prendrons comme exemple les résultats obtenus avec les diverses coupes des parcelles PK 1963.

Le plan de fumure était le suivant :



Le nombre de parcelles mis en expérience n'était pas tout à fait suffisant et le plan de fumure n'est pas entièrement symétrique. Ce désavantage ne diminue pas cependant la variabilité des traitements.

1re Coupe 1963 (fig. 4, graph A)

Pour chacune des exploitations, nous rechercherons sur le graphique (et par le calcul) la quantité d'azote qu'il aurait fallu théoriquement fournir pour que l'exportation aérienne, mesurée, se trouve sur la droite moyenne de référence de l'année, soit :

$$Y = 0{,}545\ x + T.$$

Pour la première coupe, le plan de fumure indique que 0, 40, 60, 100 unités ont été apportées entre la dernière coupe 1962 et la 1re coupe de 1963. En reportant sur graphique, les résultats de ces différentes doses, on s'est aperçu que les chiffres se groupaient en deux séries, suivant que les parcelles portant les traitements, avaient ou non reçu de l'azote avant la dernière coupe de 1962.

Le calcul indiqué plus haut (traduit sur le graphique par les horizontales rejoignant la droite de référence) conduit aux remarques suivantes :

Sans fumure avant la dernière coupe de 1962	40 unités	se comportent comme	33	soit —	7 unités
	60 unités	se comportent comme	49	soit —	11 unités
	100 unités	se comportent comme	105	soit +	5 unités
Avec 40 unités d'azote avant la dernière coupe de 1962	40 unités	se comportent comme	49	soit +	9 unités
	60 unités	se comportent comme	88	soit +	28 unités
	100 unités	se comportent comme	122	soit +	22 unités

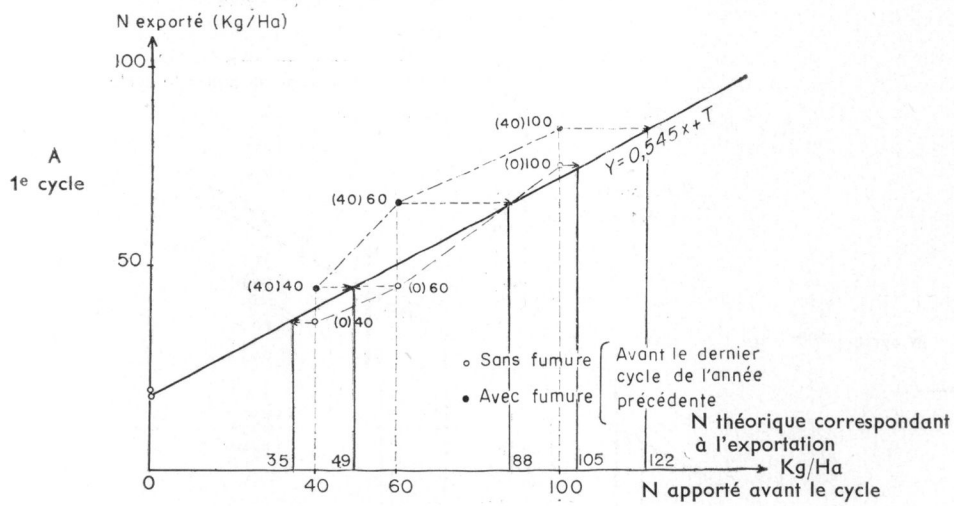


FIG. 4 (graph. A). — *Exportations du 1er cycle*

Pour les parcelles sans fumure avant la dernière coupe de 1962, la part prise par les parties souterraines est donc plus importante que prévue pour les doses 40 et 60 unités puisque l'exportation est moindre. La différence de ces prélèvements,

avec ceux des parcelles antérieurement fumées, au contraire moins élevée, est de :

16 unités	[+ 9 — (— 7)]	avec une fumure de 40
17 unités	[22 — 5]	avec une fumure de 100
39 unités	[28 — (— 11)]	avec une fumure de 60

Sans cette dernière valeur de 39 unités, on aurait pu évaluer à une quinzaine d'unités, l'effet de la fumure antérieure de 1962. Ceci souligne l'importance d'une fumure faite à cette époque. Nous la retrouverons en étudiant le comportement de la troisième coupe de 1963.

Ces observations sont en accord avec les données physiologiques (MAHOU et REBISCHUNG, 1961) et mettent en évidence l'intérêt de réaliser un développement radiculaire et une mise en réserve, très précoces.

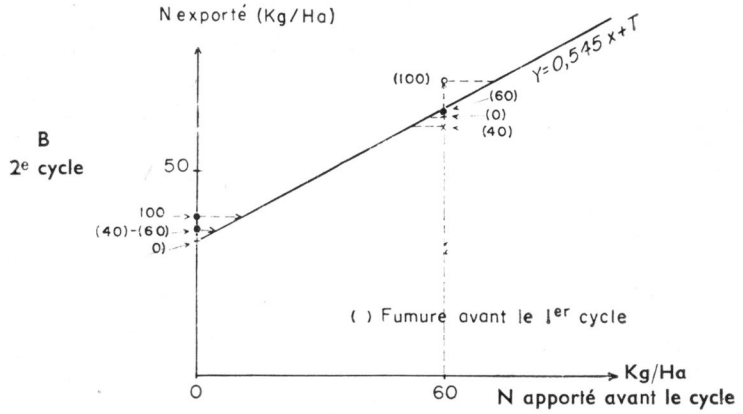


FIG. 4 (graph. B). — *Exportations du 2e cycle*

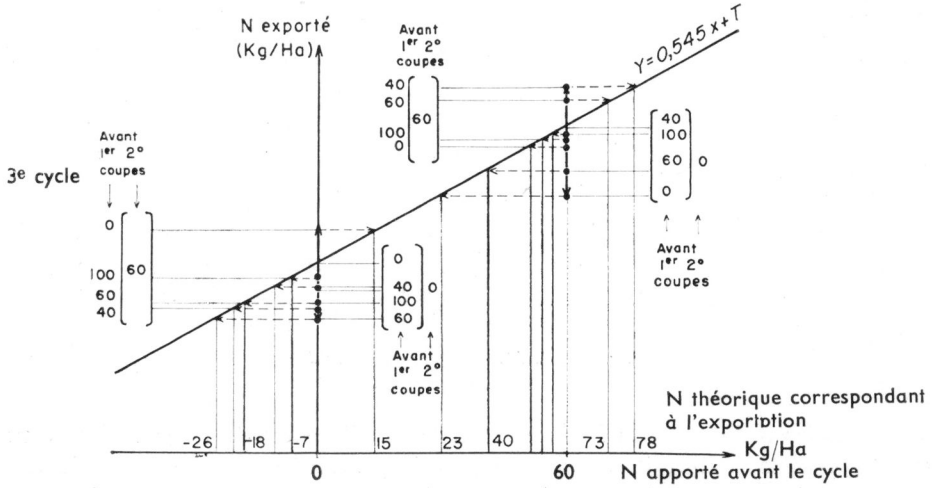


FIG. 4 (Graph. C)

2e Coupe (fig 4, graph. B)

Pour cette coupe, nous avons une seule dose d'apport (60 unités), avec quatre antécédents, à comparer aux divers témoins.

Le graphique 4 B indique peu de différences à 0 ou 60 unités entre les réponses obtenues et celles de la courbe témoin (± 10 kg) et cela quel que soit l'antécédent.

A cette époque d'apport et pour ce deuxième cycle, le végétal a fourni une réponse correspondant à celle de la droite moyenne.

3e Coupe (fig 4, graph C)

L'exportation aérienne est généralement inférieure à ce qu'elle devrait être. En reprenant les observations faites sur la 1re coupe, on doit considérer que cela traduit la préparation du système radiculaire de l'année suivante.

En se référant à la droite moyenne de corrélation, les exportations réelles correspondraient à des apports calculés dont les différences de valeurs avec l'apport réel, sont, en tenant compte des antécédents de fumures, les suivantes :

Avant le 3e cycle →	0	0	60	60
Avant le 2e cycle →	0	60	0	60
Avant le 1er cycle ↓				
0	0	+ 15	— 31	— 10
40	— 11	— 20	— 1	+ 18
60	— 26	— 18	— 20	+ 13
100	— 18	— 7	— 3	— 6

a) sont positives les trois parcelles :

0—60—0

40

ou 60 — 60

60

c'est-à-dire la parcelle n'ayant reçu une fumure qu'avant le deuxième cycle, et les parcelles régulièrement entretenues.

b) se comportent à peu près normalement :

Les parcelles recevant 100 unités en début de végétation et ayant un complément en 2e ou 3e cycle, ou aux deux.

La parcelle 40—0—60.

c) Sont nettement déficitaires :

Les parcelles ne recevant qu'*une fumure*, fournie

soit avant le dernier cycle 0—0—60.

soit avant le premier cycle { 40—0—0. / 60—0—0. / 100—0—0.

Les parcelles recevant deux apports :

— soit 40 ou 60 unités avant le premier cycle et une seule autre fumure avant le 2e ou le 3e cycle ;

— soit avant les 2e et 3e cycles.

Le plus fort déficit, noté avec la fumure fournie seulement avant le 3e cycle, laisse supposer une forte mise en réserve qui devrait se manifester au cours de l'année suivante.

Total des coupes (fig. 5)

La somme des influences, favorables ou défavorables, notées pour les différents cycles, justifie la dispersion des résultats totaux de l'année, par rapport, à la droite moyenne reliant l'azote exporté à l'azote apporté.

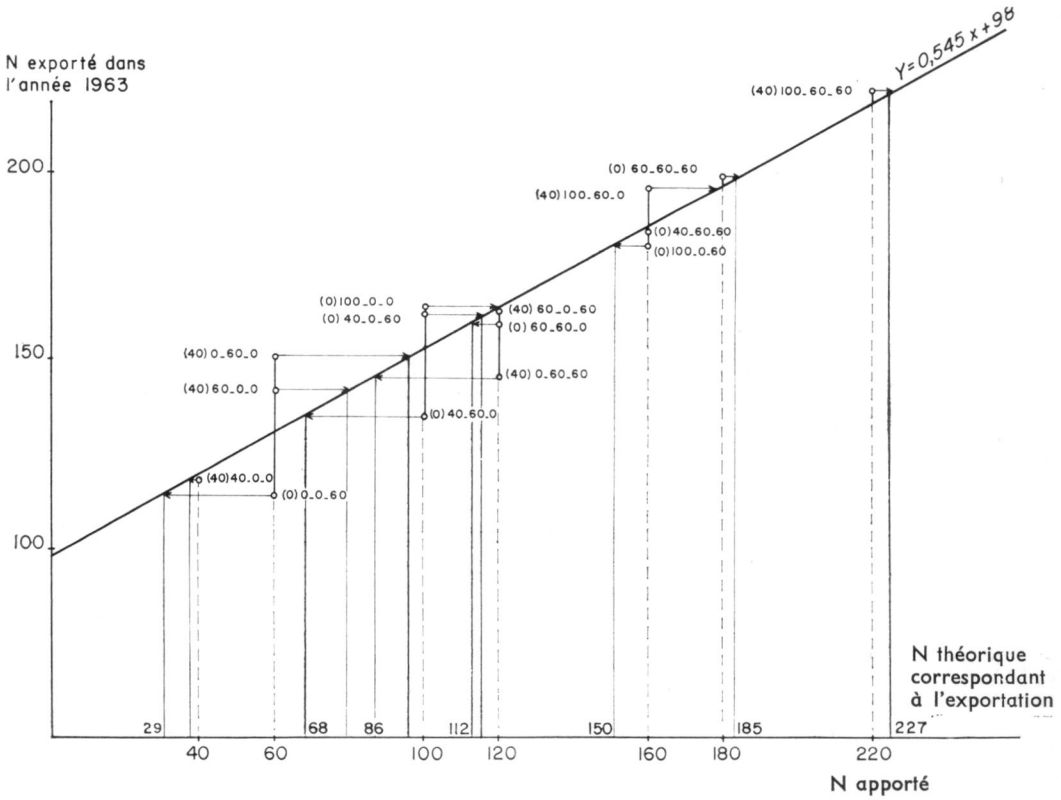


FIG. 5. — *Exportation annuelle d'azote en fonction des doses apportées et de leur répartition*

Les différences entre l'apport réel annuel et l'apport correspondant à celui qu'il aurait fallu théoriquement fournir pour que l'exportation réelle se trouve sur la droite de régression permettent les constatations suivantes :

a) *Formules comportant une fumure plus ou moins importante avant le premier cycle de végétation.*

Différences entre l'apport réel et l'apport théorique pour que les exportations réelles soient sur la courbe moyenne :

Formules (1) ↓	(1) —0—0	(1) —60—0	(1) —0—60	(1) —60—60
40	— 3	— 32	+ 17	— 2
60	+ 21	— 8	— 1	+ 5
100	+ 21	+ 20	— 10	+ 7

— formule nettement déficitaire, 40—60—0, c'est-à-dire fumure normalement soutenue au cours de la végétation et abandonnée avant le troisième cycle ;

— formules favorables 60—0—0
100—0—0 100—60—0
40—0—60

c'est-à-dire fumure importante en début de végétation ou fumure reprise en fin de végétation.

Les fumures (1) —60—60 donnent des résultats normaux.

C'est en cela d'ailleurs que — la droite moyenne rendant compte des besoins annuels aériens de la plante — les formules « déficitaires » n'indiquent qu'un comportement perturbé par un entretien non adapté. Elles peuvent correspondre à une miseen réserves par les racines, qui se répercutera l'année suivante. Nos observations s'appliquent donc seulement à une manifestation sur la production annuelle, sans préjuger du comportement ultérieur.

b) *Formules ne comportant pas d'apport en début de végétation :*

Formules	0—0—60	0—60—0	0—60—60
Différence entre l'apport réel et l'apport « théorique »	— 31	+ 37	— 34

1. *Un seul apport.*

En ne considérant que la réponse annuelle, la fumure 0—60—0 est très favorable (+ 37).

Au contraire, la fumure 0—0—60 est dans ce contexte très défavorable (— 31).

2. *Deux apports.*

0—60—60 sont défavorables (— 34) et présentent la même réaction que l'apport seul avant le troisième cycle.

Il ressort, de ce comportement annuel, que le maximum de production est évidemment obtenu avec les fumures régulières, mais que, pour des fumures incomplètes, les plus avantageuses sont représentées, soit par la seule fumure du deuxième cycle, soit par une fumure relativement importante avant le premier cycle.

Par contre, les formules relevées comme déficitaires, surtout lorsqu'elles comprennent des fumures du dernier cycle, pourraient être compensées par une production plus importante l'année suivante comme il nous a été possible de le voir en 1963, par l'arrière-action des dernières fumures de 1962.

Nous pensons donc qu'il est intéressant de pouvoir se référer à une courbe moyenne d'utilisation de l'azote par les parties aériennes. La mesure des exportations permet alors, par comparaison, d'avoir une estimation indirecte du comportement de la partie souterraine, et par là, d'évaluer approximativement, d'une part les effets d'arrière-action et d'autre part les mises en réserve et leurs époques.

VI. — PRODUCTIVITÉ DE L'AZOTE APPORTÉ

Nous venons de voir que la relation existant entre la quantité d'azote fournie sous forme de fumure minérale et la quantité d'azote exportée dans les parties aériennes, doit être considérée comme une relation moyenne dont les écarts peuvent être plus ou moins importants suivant le mode de fumure. Si l'on ne considère que les formules s'écartant peu de la moyenne — comprenant en particulier un apport suffisant avant le premier cycle ou des apports soutenus tout au long de la période de végétation — la droite de régression fournit, d'une façon satisfaisante, un aperçu du « rendement » de l'apport d'azote: $\frac{\text{(azote élaboré et exporté)}}{\text{azote fourni}} \times 100$.

Dans des publications antérieures (LEFÈVRE, et HIROUX 1962) nous avions mis en évidence une corrélation très étroite entre la quantité de matière verte produite et la quantité d'azote exportée. Cette relation, dans la limite des fumures azotées que nous avons utilisées, est indépendante de la répartition des apports.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle, dans l'examen des réponses à la fumure, nous appelions déficitaires les formules qui fournissaient des exportations d'azote inférieures à la moyenne, puisqu'en fait cela se traduit par une production de matière verte inférieure.

Le calcul, effectué sur les trois années envisagées, donne, suivant la présence ou l'absence d'un complément phosphopotassique, les résultats suivants : (graph. 6 et 7).

	Sans PK	*Avec PK*
1961	N exporté = 6.22 MV — 16	N exporté = 6.09 MV — 21
1962	N exporté = 5.69 MV	N exporté = 4.68 MV + 12
1963	N exporté = 5.43 MV — 26	N exporté = 4.72 MV — 8

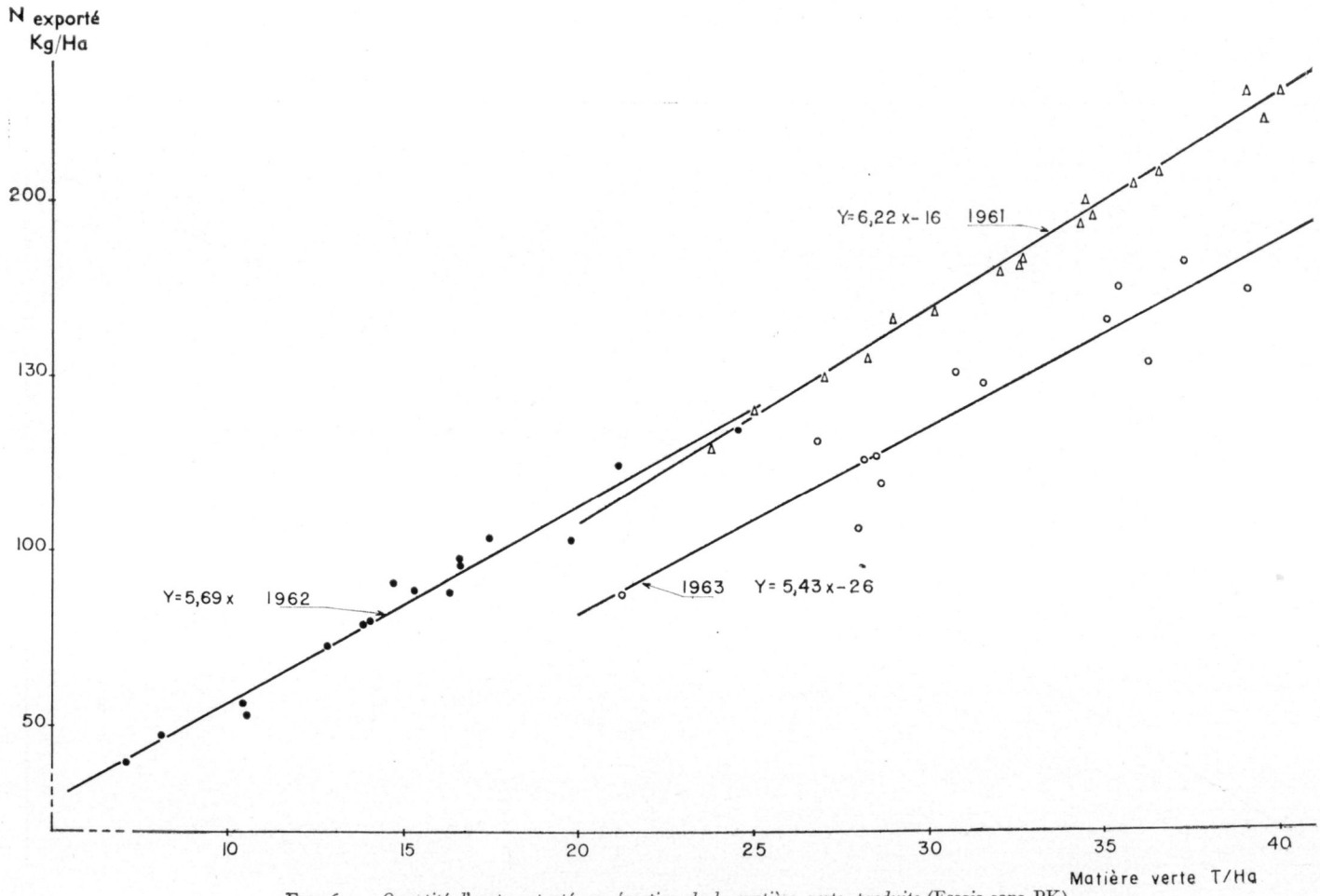


FIG. 6. — *Quantité d'azote exportée en fonction de la matière verte produite* (Essais sans PK)

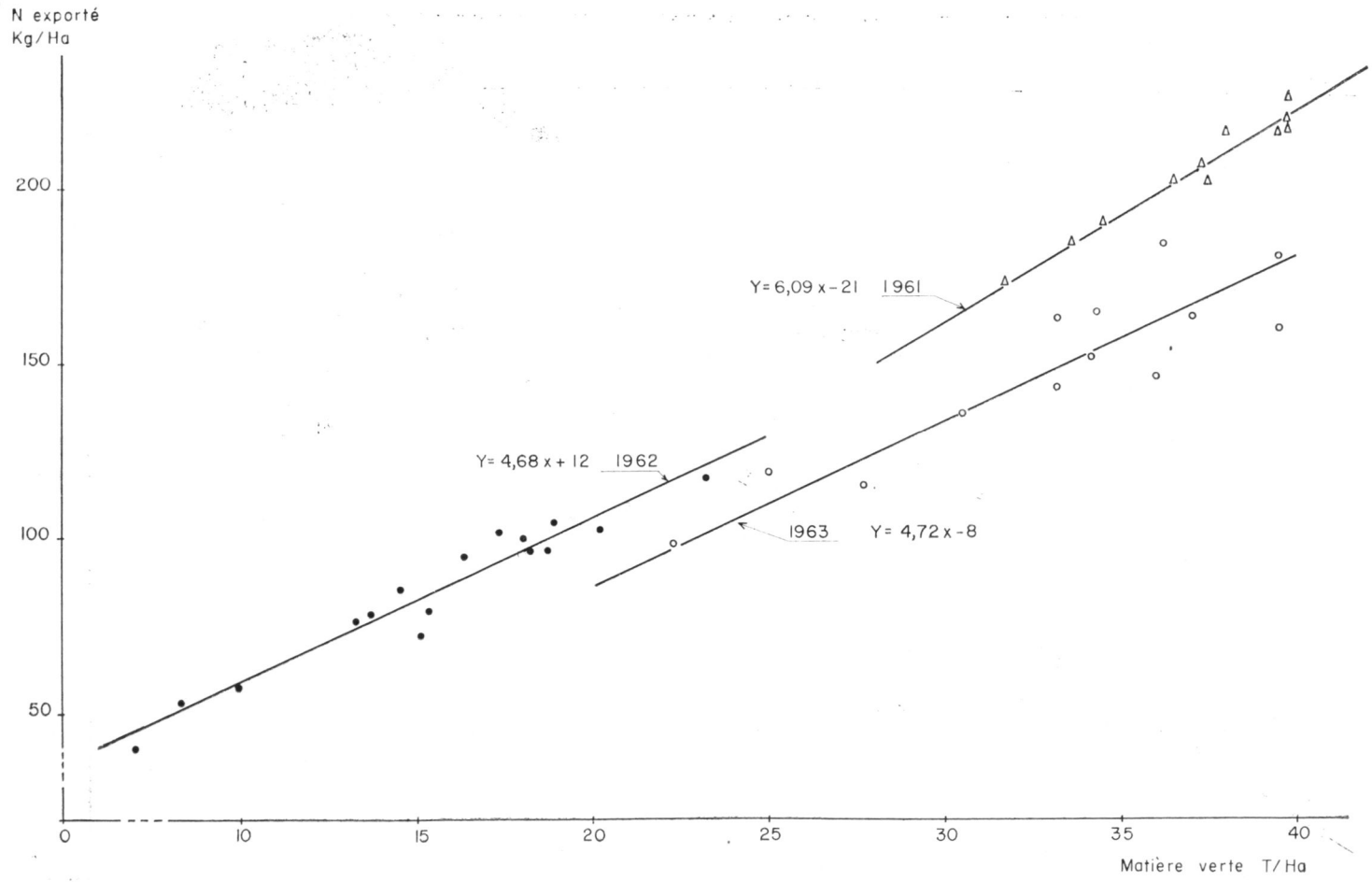


FIG. 7. — *Quantité d'azote exportée en fonction de la matière verte produite* (Essais avec PK)

N exporté exprimé en kg/ha, et matière verte exprimée en t/ha.

Il en ressort une exportation moyenne de 5,78 kg d'azote (en l'absence de fumure phosphopotassique échelonnée) et de 5,16 kg d'azote (en sa présence), par tonne de matière verte produite.

De cette corrélation, on peut en déduire une troisième, reliant la production de matière verte à la quantité d'azote apportée.

Le calcul, direct, donne les relations suivantes :

	Sans PK	*Avec PK*
1961	MV = 0.117 N apporté + 19.3	MV = 0.082 N apporté + 30
1962	MV = 0.123 N apporté + 7.6	MV = 0.110 N apporté + 8.9
1963	MV = 0.113 N apporté + 21.1	MV = 0.109 N apporté + 23

Matière verte : t/ha N, apporté : kg/ha.

Le facteur indépendant, représente la production du témoin sans azote, dont nous avons déjà signalé la variabilité en fonction des années.

En moyenne des trois années, la production de matière verte, en fonction de la quantité d'azote apportée, ressort à 0.118 t, sans PK, et 0.100, avec PK, par kg d'azote apporté ; autrement dit, 10 kg d'azote permettent une production de 1.18 t à 1 t de matière verte.

Cette productivité peut se décomposer schématiquement de la façon suivante :

— sur 10 kg d'azote fourni, on en retrouve environ 55 p. 100 dans les parties aériennes (soit 5,5 kg, résultat de la corrélation exposée, en première partie, entre l'azote exporté et l'azote apporté).

— d'après les coefficients des droites de régression notés plus haut entre l'azote exporté et la quantité de matière verte produite, une tonne de matière verte contient en moyenne 5,5 kg d'azote (5,78 sans PK ; 5,16 avec PK) ;

— donc, il est normal que l'on trouve que 10 kg d'azote puissent produire en moyenne 1 tonne de matière verte.

Cette productivité peut paraître inférieure à celle présentée par le S. P. I. E. A. (1962), mais il faut dire qu'elle s'applique à la production annuelle, alors que les résultats du S. P. I. E. A. sont en majorité obtenus avec une seule coupe.

Cette réponse, directe, de la graminée, sous forme de matière verte, à une fumure azotée, permet de suivre, encore plus simplement, la nature de l'intervention des parties souterraines, se traduisant, soit par une utilisation des réserves antérieures (arrière-action) lorsque la production est plus élevée, soit par la constitution de ces réserves lorsqu'elle est plus faible que prévue par la régression.

VII. — CONCLUSIONS

L'examen des résultats obtenus au cours de trois années, avec une culture de Fétuque recevant des fumures azotées très différenciées, a permis de dégager une possibilité d'interprétation des effets observés. Par l'intermédiaire des quantités d'azote exportées par les parties aériennes, on peut en effet noter un pourcentage

moyen d'efficacité des apports. Ceci permet, d'une part, de suivre l'effet des fumures sur les réserves du sol en général, et sur la part prise par les parties souterraines. Ce dernier point rend compte dans une certaine mesure, de l'influence des réserves, soit lors de leur constitution, soit lors de leur utilisation.

Reçu pour publication en février 1965.

SUMMARY

DISCUSSION ABOUT THE UTILIZATION OF NITROGEN FERTILIZER BY MEADOW FESCUE CONSEQUENCES FOR FERTILIZATION

Results of three-year trials with fescue receiving differential treatments with nitrogen fertilizers are assessed. Amounts of nitrogen taken up by the aerial parts of the plant showed an average percentage of utilization of the nitrogen doses. The effects of fertilizing on the general reserves of soil and on the subterranean parts of the crop could also be followed. The utilization of nitrogen by the subterranean parts of the crop reveals the effect of reserves either during their formation or during their utilization.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE STICKSTOFFDÜNGUNG AUF WIESENSCHWINGEL

Die Betrachtung der Ergebnisse von sehr unterschiedlichen Stickstoffgaben auf Wiesenschwingel ergaben im Verlaufe von drei Jahren die Möglichkeit, die beobachteten Wirkungen zu deuten. Die den oberdischen Teilen zugeführten Stickstoffmengen lassen einen mittleren Effekt der Gaben erkennen. Dies erlaubt einerseits die Wirkung, der Düngengun auf die Bodenreserven im allgemeinen, andrerseits die Teilnahme der unterirdischen Pflanzenteile zu verfolgen. Letzterer Punkt gibt in einem gewissen Masse Aufschluss über den Einfluss der Reserven, sei es bei ihrer Bildung, sei es bei ihrer Benützung.

РЕЗЮМЕ

Использование азотистых удобрений овсяницей. (*Сорт Наяда.*)

Г. ЛЕФЕВР — Г. ХИРУ — КАЙУЭТ.

Изучение результатов трехлетних опытов с овсяницей получавшей различные подкормки азотом, позволило интерпретировать наблюдавшиеся эффекты.

Анализируя количества азота, вынесенного надземными частями растения, можно вывести средний процент эффективности подкормок, что дает возможность, с одной стороны, проследить общее действие удобрения на почвенные запасы, а с другой — участие которое принимает в этом подземная часть растения. По этому последнему пункту можно, до некоторой степени судить, о влиянии запасов, или в период их накопления, или в момент их использования.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

GADET, 1962. *Quelques précisions sur le bilan de l'azote minéral dans les sols.* Communication au Congrès du Centre International des engrais chimiques. Naples, 25 et 26 octobre 1962.

LEFÈVRE G. et HIROUX G., 1962. Interaction des fumures phosphopotassiques et azotées sur la production et les exportations d'une Fétuque des prés variétés *Naïade. Ann. agron.*, 587-610.

MOUAH et REBISCHUNG, 1961. Biologie des Graminées. *Bull. tech. Inform. Ingrs. Serv. agric., Fr.*, 889-910

S. P. I. E. A., 1962. La fumure azotée des prairies en 1962. Résultats de 584 démonstrations.

Ann. agron, 1965, **16**, (2) 223-224.

CHRONIQUE DES LIVRES

STROGONOV (B. P.). — PHYSIOLOGICAL BASIS OF SALT TOLERANCE OF PLANTS. — (Traduit du russe). Jerusalem, Israel, Program for scientific Translations, 1964, 279 p.

Aussi longtemps que l'étude de la végétation des sols salés a été de l'unique ressort des écobotanistes, on considérait très généralement que, par opposition aux glycophytes, les halophytes, plantes adaptées ou pouvant s'adapter aux sols salés, devaient être considérées comme des xérophytes, c'est-à-dire des plantes adaptées physiologiquement et anatomiquement à des quantités limitées d'eau dans le sol ou encore à des pressions osmotiques très élevées de la solution de sol. Cette théorie qui a prévalu jusqu'au milieu du XIXe a faussé l'interprétation de résultats, qui revus aujourd'hui sous un angle plus physiologique, font apparaître que les sels agissent également sur la plante par un effet de toxicité.

L'application des techniques expérimentales de physiologie ont permis de dissocier l'action d'une pression osmotique trop élevée de celle d'une action toxique vraie et spécifique de la nature des sels. C'est ainsi que les anions ont une action nocive plus grande que les cations, et que la toxicité des anions eux-mêmes varie avec leur nature. En condition de salinité élevée, les altérations de la structure protoplasmique qui diminuent l'interdépendance naturelle des cellules et limite de ce fait les échanges d'eau et de sels de cellule à cellule, sont beaucoup plus accusées avec les ions Cl^- qu'avec les ions SO_4 ; les modifications anatomiques des plantes, que leur confèrent les caractéristiques typiques de la succulence, sont également sous la dépendance des propriétés physico-chimiques des sels et en particulier des anions : les ions SO_4 inhibent l'extension des cellules et déterminent la déshydratation des tissus, les ions Cl inhibent la division cellulaire, en augmentant l'extension et augmentent également l'hydratation des tissus. Il en est de même pour les échanges d'eau, entre le sol et la plante.

La notion de type de salinité, qui peut être définie par le rapport des sels entre eux, revêt dès lors une importance toute particulière d'autant plus que les espèces végétales sembleraient plus ou moins adaptées à un type de salinité donné. Il en est de même des micro-organismes de la rhizosphère qui peuvent être considérés comme des indicateurs biologiques des conditions de milieu et en particulier du degré de salinité, du type de composition saline et de la nature des excrétions racinaires.

Dans l'étude de la résistance des plantes à la salinité il convient de dissocier l'effet osmotique (concentration du sel dans le milieu) de l'effet toxique (concentration du sel dans la plante). Les halophytes ont un métabolisme spécial qui leur permet de résister à un excès de salinité. Chez les glycophytes l'augmentation de salinité du milieu détermine des modifications profondes du métabolisme, modifications également spécifiques du type de salinité et de l'espèce végétale. A titre d'exemple, l'auteur expose ses travaux sur le cotonnier chez lequel il a mis en évidence que l'intoxication par les ions Cl^- est le résultat d'une accumulation de putrescine. La connaissance des modifications du métabolisme devrait permettre de déterminer les réactions affectées en premier lieu par un excès de sel, de connaître le mécanisme de l'intoxication et de faciliter l'obtention d'espèces résistantes à une salinité d'un type déterminé.

Diverses méthodes sont proposées pour l'obtention d'espèces résistantes, ce sont le pré-traitement des graines, la culture prolongée des plantes sur sols salés, la sélection artificielle et les croisements intervariétaux. Mais les résultats ne sont entièrement satisfaisants que dans la mesure où l'on tient compte du type de salinité.

L'auteur conclut en jetant les bases d'une classification des sols salés, tenant compte non seulement du degré de salinité, mais encore du type de salinité.

D. B.

LE POTASSIUM ET LA QUALITÉ DES PRODUITS AGRICOLES (FOURRAGES, FRUITS A NOYAU ET A PÉPINS, POMMES DE TERRE). — Compte rendu du 2e Colloque régional de l'Institut de la Potasse, Morat (Suisse), 1964. Berne, Institut international de la Potasse, 1964, 208 p.

Ce Colloque organisé par le Conseil scientifique de l'I. I. P. a consacré ses activités à l'étude de l'influence des engrais potassiques sur la qualité des produits agricoles et sur l'amélioration des rendements.

Un premier Colloque tenu à Nexford (Irlande) avait montré le rôle joué par le potassium dans la croissance et le développement des plantes fourragères. Le 2e Colloque dont il est ici question, a mis en lumière le rapport existant entre la qualité des produits fourragers et les besoins en éléments nutritifs des animaux. Une seconde séance traita de la fertilisation potassique des fruits à pépins et à noyau et de son influence sur leur qualité. Enfin, au cours d'une troisième séance, des spécialistes relatèrent les résultats de leurs expériences sur l'influence de la fertilisation potassique sur la qualité des plants de pommes de terre, la synthèse des protéines et des hydrates de carbone ainsi que la qualité technologique des pommes de terre.

J. L.

COMPTES RENDUS DE LA DEUXIÈME CONFÉRENCE TRIENNALE DE L'ASSOCIATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE SUR LA POMME DE TERRE. — Pise (Italie), 2-7 septembre 1963. Wageningen, European Association for potato research, 247 p. (Prix : 30 fl.).

Les comptes rendus du congrès comprennent deux parties bien distinctes : d'une part les exposés généraux relatifs aux divers domaines de recherche sur la pomme de terre, d'autre part les résumés des conférences tenues dans les différentes sections (Agronomie, Physiologie, Variétés, Pathologie, Virologie, Mécanisation, Utilisation).

Les exposés généraux sont les suivants :

— E. AVANZI (Pise). La culture de la pomme de terre en Italie (en anglais).

— U. DE CILLIS (Rome). Problèmes agronomiques de la pomme de terre dans le bassin de la Méditerranée (en français).

— C. A. HUYSMAN (Wageningen). Développements récents dans l'amélioration de la qualité des pommes de terre (en anglais).

— P. MADEC (Landerneau). Les développements les plus récents dans le domaine de la physiologie de la pomme de terre (en français).

— A. E. BOYD (Edimbourg). Développements récents dans la mycologie et la bactériologie (en anglais).

— H. GOFFART (Münster). Nouveaux développements dans la recherche sur les nématodes (en allemand).

— G. ROLAND (Gembloux). Les développements les plus récents dans la virologie de la pomme de terre (en français).

— W. J. WEST (Écosse). Développements récents dans la mécanisation (en anglais).

— W. WIRTHS (Dortmund). Nouveaux développements dans l'utilisation de la pomme de terre, considérée en particulier au point de vue valeur alimentaire (en allemand).

E.J.

MORETTE (A.). — PRÉCIS D'HYDROLOGIE. — « Collection : Précis de pharmacie », Paris, Masson et Cie, 1964, 532 p.

Cet ouvrage, qui n'est pas un Traité, mais dont le contenu est sensiblement étendu et qui tient compte des acquisitions récentes, doit permettre au lecteur de se familiariser avec les différents aspects de l'Hydrologie, ou de compléter des connaissances antérieures. Il pourra aussi s'en servir comme d'un guide analytique.

Une première partie du *Précis* est consacrée à des notions de climatologie, laquelle est très étroitement liée non seulement au cycle de l'eau mais également au thermalisme, et aussi à des notions de géologie et d'hydrogéologie, indispensables à l'interprétation des résultats de l'hydrologue analyste. Suit un long exposé relatif aux méthodes d'analyse de l'eau.

Puis trois parties du livre se rapportent respectivement aux eaux d'adduction, aux eaux à usages industriels et aux eaux thermominérales. Le lecteur y puisera un grand nombre d'indications théoriques et pratiques. La physico-chimie moderne y est mise à contribution aussi bien que la technologie. La bactériologie et l'hydrobiologie y revêtent l'importance qu'elles présentent pour l'hydrologue.

L'auteur s'est efforcé d'exposer les divers chapitres de son ouvrage avec le maximum de concision et d'équilibre, mais aussi avec le maximum de documentation.

Non seulement ce livre devrait être utile au pharmacien, mais il devrait aussi intéresser tous ceux qui se penchent sur les problèmes de l'eau.

(D'après l'analyse de l'éditeur).

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction,* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date du parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5 *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections d' « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. CHAMINADE, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise) France. On demande deux exemplaires.

AGRONOMIQUE.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 3

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique, à l'exception des sommaires et résumés.

Ann. agron., 1965, **16** (3), 231-263

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DE L'INFILTRATION DE L'EAU NON SATURANTE (1)

CAS D'UN SOL INITIALEMENT SEC ET D'UN ARROSAGE SANS FORMATION DE PLAN D'EAU EN SURFACE

DEUXIÈME PARTIE (2)

A. FÉODOROFF

Laboratoire des Sols, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

CHAPITRE IV

RECHERCHE DE SCHÉMAS EXPLICATIFS POUR RENDRE COMPTE DE L'INFILTRATION SANS PLAN D'EAU EN SURFACE

Nous avons vu que ni les théories de la capillarité, ni le processus proposé par YOUNGS (1960) ne permettent de représenter fidèlement les phénomènes observés. La complexité même de ce corps poreux qu'est le sol s'oppose à l'application directe des principes physiques simples basés sur la capillarité. Dans le cas étudié, la difficulté est accrue par le fait que le sol n'est pas saturé.

L'essai de schématisation que nous allons proposer est purement descriptif. Il ne constitue qu'une première approche pour rendre compte des données expérimentales.

Dans le phénomène qui nous intéressse, l'infiltration concerne un matériau préalablement sec. On a toutes les raisons de penser que l'eau pénètre et se déplace en priorité dans les vides qui offrent le moins de résistance, c'est-à-dire dans les plus gros pores. Cette conception est en accord avec le schéma de HALLAIRE (1953) qui a montré que, pour l'horizon B, l'humidité du front en ascension capillaire correspond à une succion de l'ordre de 125 cm, alors que la même humidité en régime de drainage correspond à une succion de 1 450 à 2 800 cm. Un taux d'humidité ne préjuge donc en rien, *a priori*, de la façon dont l'eau est logée, ce qui limite singulièrement tout

(1) Thèse de Docteur-Ingénieur, soutenue le 23 février 1965, à la Faculté des Sciences de Paris.
(2) La première partie de ce mémoire est parue dans le n° 2,1965 des Annales agronomiques.

essai d'explication fondé sur des humidités considérées en valeur absolue. C'est pourquoi nous allons parler dorénavant en termes de porosité.

En se basant sur les idées généralement admises, on peut considérer que :

a) la porosité du sol sec est constituée par des vides de dimensions différentes ;

b) ces pores peuvent être regroupés par classes définies par leurs dimensions extrêmes ;

c) chaque classe représente une fraction plus ou moins importante de la porosité totale.

Dans une première étape, nous supposerons que la porosité reste inchangée au contact de l'eau, ce qui élimine les effets de gonflement et de dégradation de la structure.

Nous avons choisi un mode de représentation simple (fig. 27). En abscisses figurent les classes de pores par ordre de dimensions croissantes, jusqu'au point S (saturation) qui représente la porosité totale. En ordonnées sont les profondeurs (OZ).

Une ligne brisée telle que *ABCD* délimite chacune des classes qui, à un moment donné et à une profondeur donnée, est effectivement affectée par l'infiltration, c'est-à-dire plus ou moins remplie d'eau. La longueur d'un segment vertical tel que *PnZn* est proportionnelle à la profondeur d'humectation de la classe considérée. La longueur d'un segment horizontal tel que *D'A'* correspond à l'humidité au niveau donné. Si ce segment est déplacé vers la droite par translation, cela indique que la même quantité d'eau est logée dans des pores plus gros en moyenne.

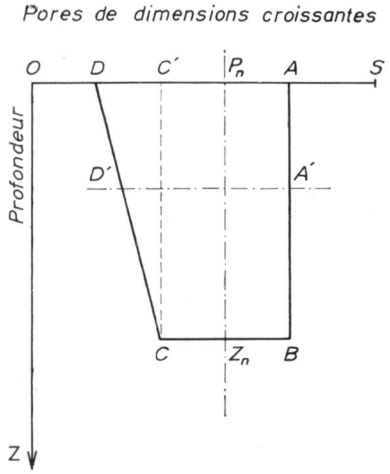


FIG. 27. — *Représentation du processus d'infiltration.*

A. Développement de l'infiltration pour une intensité d'arrosage donnée

D'après les résultats expérimentaux, tout se passe comme si deux phénomènes jouaient conjointement : une masse d'eau se déplace vers la *profondeur* sous l'effet de la gravité et de la succion, en suivant un chemin préférentiel correspondant à des pores relativement gros (fig. 27, aire *ABCC'*). Simultanément des pores plus fins, encore vides,

prélèvent par succion sur cette masse des quantités d'eau qui suivent un *cheminement latéral* et échappent ainsi au mouvement descendant (fig. 27, aire *CC'D*). Le développement chronologique de ce processus se présenterait de la façon suivante :

1° *Premier stade : vitesse du front décroissante*

Les premières gouttes qui tombent sur le sol sec pénètrent dans les pores qui offrent le moins de résistance, c'est-à-dire dans les plus gros. Simultanément des pores plus fins et vides, interconnectés avec ceux qui sont remplis, exercent une succion sur l'eau. Les ménisques les plus grands se rompent : la classe *AS* se libère de l'eau qu'elle contenait. Une partie de l'eau progresse vers le bas et en même temps le remplissage se développe vers des classes de dimensions de plus en plus faibles, c'est-à-dire vers la gauche sur le graphique.

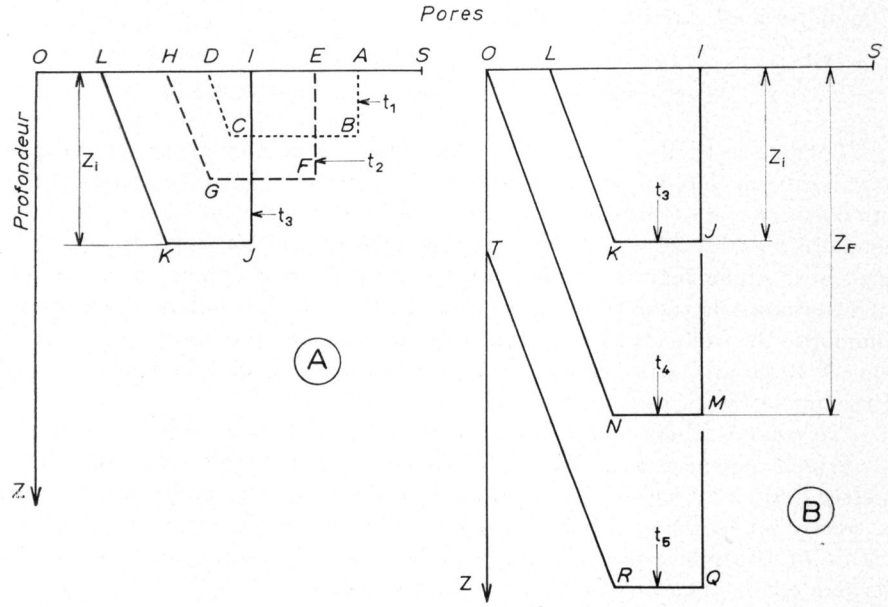


FIG. 28. — *Développement de l'infiltration pour une intensité d'arrosage donnée.*
A : stade initial à vitesse décroissante.
B : stade à vitesse constante.

Au bout d'un temps t_1 (ligne *ABCD*) la couche de surface, qui est restée le plus longtemps au contact de l'eau, est humectée jusqu'en *D* (fig. 28 A). Avec la profondeur, la durée de contact avec l'eau décroît et la progression latérale de l'eau par succion n'affecte que des classes de dimensions de plus en plus élevées, ce qui est représenté par la ligne *CD*. Pour la simplicité nous l'avons assimilée à une droite. S'agissant de la représentation d'un phénomène différé, dépendant de la forme et du nombre des pores, il est très probable que la courbe est plus complexe. Actuellement nous n'avons aucun moyen de la préciser.

Au temps t_1 le front occupe l'intervalle de classes CB, constitué de gros pores, et sa vitesse est grande.

Au fur et à mesure que le temps, et donc l'apport d'eau, progresse, le prélèvement latéral par succion continue à s'exercer à tous les niveaux, ce qui a pour effet de vider les plus gros pores au profit de classes de dimensions plus faibles. Au temps $t_2 > t_1$ cette distribution est représentée par $EFGH$. Le front correspond au remplissage des classes GF, en moyenne plus petites que CB. Sa vitesse en t_2 est par suite plus faible qu'en t_1 car les frottements liés à la surface totale de contact sol-eau sont plus élevés.

Au temps $t_3 > t_2$ le même processus conduit à la répartition schématisée par $IJKL$. Le front correspond au remplissage de l'intervalle de classes KJ de dimensions moyennes plus faibles que GF. La vitesse du front en t_3 est plus faible qu'en t_2. En surface la succion par les pores fins n'est pas achevée.

Le processus ainsi schématisé rend compte des résultats expérimentaux suivants : ralentissement progressif de la vitesse depuis la temps $t = 0$ jusqu'à t_3 ; le front a atteint à ce moment la profondeur z_i ; la zone d'humectation à fort gradient d'humidité n'est pas totalement formée.

2° *Deuxième stade : vitesse du front constante*

Lorsque le front a atteint la profondeur z_i, nous admettons qu'il s'établit, à son niveau, un équilibre dynamique entre, d'une part, l'apport d'eau réglé par l'intensité d'arrosage et, d'autre part, les différentes forces régissant les prélèvements latéraux. En d'autres termes, nous admettons qu'à partir de la profondeur z_i et quelle que soit la profondeur $z > z_i$, le remplissage au niveau du front affecte toujours les mêmes classes de porosité et reste constant. Cela correspondrait à la constance de l'humidité du front et de sa vitesse, vérifiée expérimentalement. Sur le graphique (fig. 28 B) ce processus est représenté par la constance de la longueur du segment décrivant le front : $KJ = NM$ etc.

Nous avons admis qu'à la fin du premier stade les prélèvements latéraux n'avaient pas atteint leur maximum. Donc à partir du temps t_3 ($IJKL$) ils continuent à progresser jusqu'à atteindre le point O correspondant aux plus petits pores. Au temps t_4 la zone d'humectation ($IMNO$) a achevé son développement. Sa profondeur est $IM > IJ$. Ensuite cette zone se déplace vers le bas par translation, en laissant derrière elle la zone intermédiaire TO qui s'allonge.

Cette succession de schémas permet de représenter la donnée expérimentale la plus fréquente dans nos essais : le front avance à vitesse constante *avant* que la zone à fort gradient (ou d'humectation) ne soit formée. Elle fait en outre intervenir le phénomène de translation dont nous avons vérifié l'existence avec un de nos sols.

B. Variations avec l'intensité d'arrosage

En plus de nos propres observations, nous allons faire intervenir les résultats de MARSHALL et STIRK (1949).

Ces auteurs ont soumis à l'arrosage par aspersion des colonnes de sols différents (sable de dune, limon, argile). A l'intérieur des colonnes ils avaient placé des tensiomètres. Ces dispositifs étaient arrosés avec des intensités différentes. Comme réfé-

rence les auteurs ont pris la « capacité minima d'infiltration », débit relativement constant véhiculé par le sol lorsqu'il est soumis à l'humectation avec un plan d'eau constant en surface, un certain temps après le début de l'expérience. Ils ont appliqué une intensité soit égale à la « capacité minima d'infiltration », soit deux fois ou quatre fois plus faible.

Les mesures de succion sont relatives à la zone intermédiaire du profil hydrique. Elles montrent que la valeur moyenne des succions mesurées en cours d'infiltration est d'autant plus élevée que l'intensité d'arrosage est réduite. Ces succions sont faibles et comprises entre 7 et 22 cm suivant les essais.

On peut en conclure que les succions ainsi mesurées correspondent aux pores les plus gros effectivement occupés par l'eau dans un essai considéré. Par voie de conséquence, lorsque l'intensité est plus élevée, il y a des pores plus gros effectivement remplis par l'eau. Cette façon de voir rejoint les conclusions de HANKS et BOWERS (1963) qui décrivent ainsi l'influence de la relation diffusivité-humidité sur l'infiltration (avec plan d'eau) : « lorsque la diffusivité D est multipliée par 2 dans la zone de saturation, l'infiltration est modifiée. Cependant des variations du centuple de la diffusivité dans les faibles humidités n'ont pas d'influence significative sur l'infiltration. Cela implique que l'infiltration est gouvernée, dans une large mesure, par des propriétés du sol à des humidités voisines de la saturation et est peu influencée par les propriétés du sol dans la gamme des faibles humidités. » Il est vraisemblable que « l'humidité voisine de la saturation » correspond au remplissage des plus gros pores, qui exerceraient ainsi un rôle prédominant.

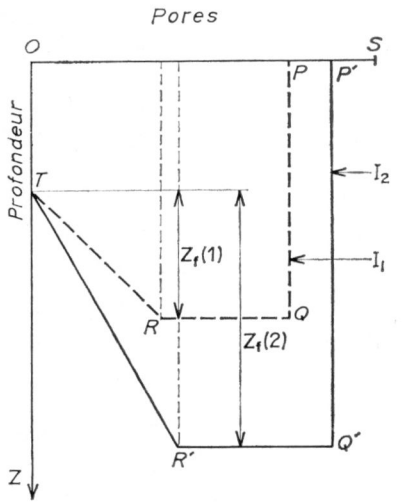


FIG. 29. — *Développement de l'infiltration pour deux intensités d'arrosage* ($I_1 < I_2$).
Stade à vitesse constante. Les temps sont différents.
Pour faciliter la comparaison, on fait coïncider les points T.

Nous proposons donc de représenter ces phénomènes avec les schémas de la figure 29. Nous considérons la répartition de l'eau avec deux intensités telles que $I_1 < I_2$. Ces schémas sont relatifs au régime stable de l'infiltration : la vitesse du

front est constante et la zone à fort gradient est formée ($t > t_4$). Ils permettent de rendre compte de la plupart des données expérimentales :

— la succion dans la zone intermédiaire (de profondeur OT) est la plus faible avec I_2. Par conséquent des pores plus gros sont remplis d'eau : $OP' > OP$. Donc l'humidité de la zone intermédiaire est plus élevée avec la plus forte intensité d'arrosage ;

— la vitesse du front devient constante après une pénétration z_i plus faible avec I_1 qu'avec I_2. Comme suite du schéma proposé antérieurement pour lepremier stade de la formation du profil, R' est situé sur un axe vertical plus à droite que R ;

— l'engorgement de la zone d'humectation (différence entre l'humidité du front et celle de la zone intermédiaire) est par conséquent plus important avec l'intensité la plus forte ;

— la vitesse d'infiltration V est la plus grande avec I_2. Cela correspondrait à un remplissage de pores plus gros en moyenne ($Q'R'$ plus à droite que QR). Pour les faibles intensités, l'expérience montre que V croît avec l'humidité du front : $Q'R'$ représente une teneur en eau plus forte que QR. Pour les intensités élevées, l'expérience montre que V est pratiquement indépendant de l'humidité au front : il faut admettre alors un décalage de $Q'R'$ vers la droite, de telle façon que les pores occupés par l'eau en mouvement soient de plus en plus gros, mais que l'humidité totale reste inchangée quel que soit I ;

— l'épaisseur z_f de la zone d'humectation augmente avec I. Cela proviendrait du fait que, à l'arrière du front, les prélèvements latéraux par succion sont relativement plus lents avec I_2 qu'avec I_1, car la vitesse du front est plus grande dans le premier cas. Par conséquent $R'T'$ possède sur le schéma une pente plus forte que RT, et donc z_f (2) > z_f (1).

C. Quelques aspects exclus du schéma général

La façon dont nous avons imaginé le processus d'infiltration s'harmonise avec la plupart des résultats expérimentaux. Cependant certains ont été délibérément laissés de côté : nous allons à présent les examiner.

1° *Les longueurs* z_f *et* z_i *sont égales*

Cette égalité, impliquant la coïncidence entre la formation complète de la zone d'humectation et l'établissement de la vitesse constante, n'apparaît que rarement, et toujours pour les *plus faibles intensités* d'arrosage. Par suite, les prélèvements latéraux par succion seraient relativement importants par rapport à la fraction de l'eau qui migre en profondeur. Dans ces conditions il suffirait d'admettre, en nous reportant au schéma (fig. 28 A), que lorsque le front a atteint son remplissage« d'équilibre » (KJ), les prélèvements latéraux en surface ont rempli *tous* les pores jusqu'aux plus fins, autrement dit la ligne KL se trouverait remplacée par une ligne KO.

Une telle convergence pourrait être facilitée par une bonne mouillabilité du matériau et par l'absence de gonflement. YOUNGS (1960) l'a en effet invoquée à la suite d'essais avec de la poussière d'ardoise.

2° *La zone intermédiaire des profils hydriques n'a pas une humidité constante*

Dans nos essais ce phénomène s'observe essentiellement avec les sols de limon, peu stables. Il apparaît également dans les travaux de RUBIN (1964) avec le sol argileux. Au contraire l'humidité de la zone intermédiaire est relativement constante avec le sol ferrallitique stable à l'eau et non gonflant ainsi qu'avec les sables. Pour ce dernier matériau RUBIN a obtenu le même résultat que nous, et YOUNGS (1960) l'a constaté avec de la poussière d'ardoise.

On est donc amené à penser que c'est l'instabilité de la structure qui est à l'origine de l'accumulation graduelle de l'eau de bas en haut de la zone intermédiaire. Mais il n'est pas facile de préciser la nature intime des phénomènes. On en est réduit à des hypothèses. Dans la mesure où le gonflement intervient nous pouvons prévoir :

a) une augmentation de l'eau stockée par les colloïdes [1] et corrélativement,

b) une réduction de la dimension des gros pores, entraînant une diminution de la vitesse de l'eau.

Chacun de ces phénomènes serait d'autant plus accentué que la terre est restée longtemps au contact de l'eau. Leur effet se ferait donc de moins en moins sentir avec la profondeur, ce qui se manifesterait par l'abaissement de l'humidité.

3° *Accumulation d'eau dans la couche superficielle*

La façon peu systématique dont se manifeste ce phénomène rend illusoire la recherche d'une explication unique. Tout au plus pourrait-on invoquer, pour les sols instables, les conséquences du gonflement, de la dispersion ou de l'éclatement des agrégats. Avec les sols sableux, on pourrait penser à un glissement des grains en présence d'eau en excès, ce qui réduirait les dimensions des plus gros pores. Il s'agirait en somme dans la plupart des cas d'une modification de la morphologie de la porosité dans la couche qui reste le plus longtemps en contact avec l'eau, et dont l'humidité est probablement très élevée tout au début de l'infiltration.

D. Vérification expérimentale de l'effet de pénétration « en coin »

Pour rendre compte des résultats expérimentaux à l'aide de nos schémas, nous avons admis qu'une partie de l'eau apportée au sol pénètre de préférence dans certains pores qui correspondent au front, alors qu'une autre partie échappe au mouvement descendant en humectant des pores plus fins situés à l'amont du front. L'eau entrerait ainsi dans le sol par un effet de « coin » que nous nous sommes proposé de vérifier par une voie expérimentale indépendante.

Le principe de ce contrôle est le suivant : commencer l'arrosage d'une colonne de terre sèche avec de l'eau pure, puis remplacer cette source d'arrosage par de l'eau

[1] Pour QUIRCK et PANABOKKE (1962), aux faibles succions et avec des sols moyennement argileux, l'eau de gonflement peut constituer 10 à 15 p. 100 de la terre sèche. Quelques essais effectués par des voies différentes confirment cet ordre de grandeur.

marquée, apportée avec la même intensité. A l'issue de l'expérience, on recherche dans la colonne de terre la répartition du traceur, ainsi que celle de l'eau. Pour tirer des conclusions, il faut faire l'hypothèse que la diffusion propre du traceur est négligeable, et donc que le traceur se déplace avec sa solution.

Comme traceur nous avons choisi l'ion chlore, qui est d'un usage assez courant dans l'étude de ce genre de problèmes (ABRAMOVA, 1956 ; TSCHAPEK, 1961). Son dosage par le nitrate d'argent peut être réalisé avec une grande précision grâce à la détermination potentiométrique du virage au moyen de deux électrodes Ag-AgCl (MCINNES et DOLE 1928).

1° *Réalisation de l'essai*

Une colonne de 30 cm de haut a été remplie d'Horizon B, avec une densité apparente de 1,2. Elle fut soumise à un arrosage à l'eau pure, puis, au bout d'un certain temps, elle fut rapidement pesée et placée sous un capillaire alimenté par une solution de Cl_2Ca à 1 p. 100 (soit une concentration de 16,9 méq/100 cm³). A l'issue de ce nouvel arrosage, elle fut de nouveau pesée. La quantité d'eau pure ainsi apportée au début de l'essai était de 30,0 mm avec une intensité de 0,147 mm/mn. Puis 21,9 mm de solution de chlorure ont été apportés avec une intensité de 0,140 mm/mn (légèrement plus faible que pour l'eau pure). La durée totale de l'arrosage a été de six heures.

On a prélevé ensuite le sol par couches de 1 cm environ. Dans chacune d'elles on a déterminé l'humidité et la teneur en chlore.

A partir de ces données, on peut évaluer, à chaque niveau, la quantité d'eau « apportée » (c'est-à-dire de solution de Cl_2Ca). Soit une couche dont le poids de terre sèche (à 105°) est y g, contenant x méq. de Cl. La solution d'apport contient z méq. de Cl pour 100 cm³ d'eau. La teneur en solution de cette couche, exprimée en cm³ de liquide pour 100 g de terre sèche, est donnée par

$$h_s\ \% = \frac{100 \cdot x \cdot 100}{z \cdot y}$$

2° *Résultats et discussions. Pénétration et déplacement de l'eau*

La teneur en solution (*hs*) est relativement constante dans les quatre premiers centimètres de la colonne (fig. 30). Ensuite elle tombe très rapidement jusqu'à 8,5 cm de profondeur. Plus bas, et jusque dans la terre sèche, les concentrations en Cl par rapport au sol sont quasiment constantes, sauf un léger accroissement au front. On peut donc admettre que la solution de chlorure a atteint seulement la profondeur de 8,5 cm.

Deux faits sont particulièrement dignes d'attention :

— dans les deux premiers centimètres, la teneur en solution est sensiblement égale à l'humidité totale,

— à partir du 5e centimètre, la teneur en solution décroît alors que la teneur totale en eau reste pratiquement constante.

Si l'on retient l'hypothèse généralement admise que l'ion Cl diffuse relativement

peu (dans le temps considéré) dans l'eau pure contenue initialement dans le profil [1], et qu'on admet par conséquent que la concentration en Cl indique la position de la solution, on est fondé à penser que l'eau d'apport pénètre dans la terre humide

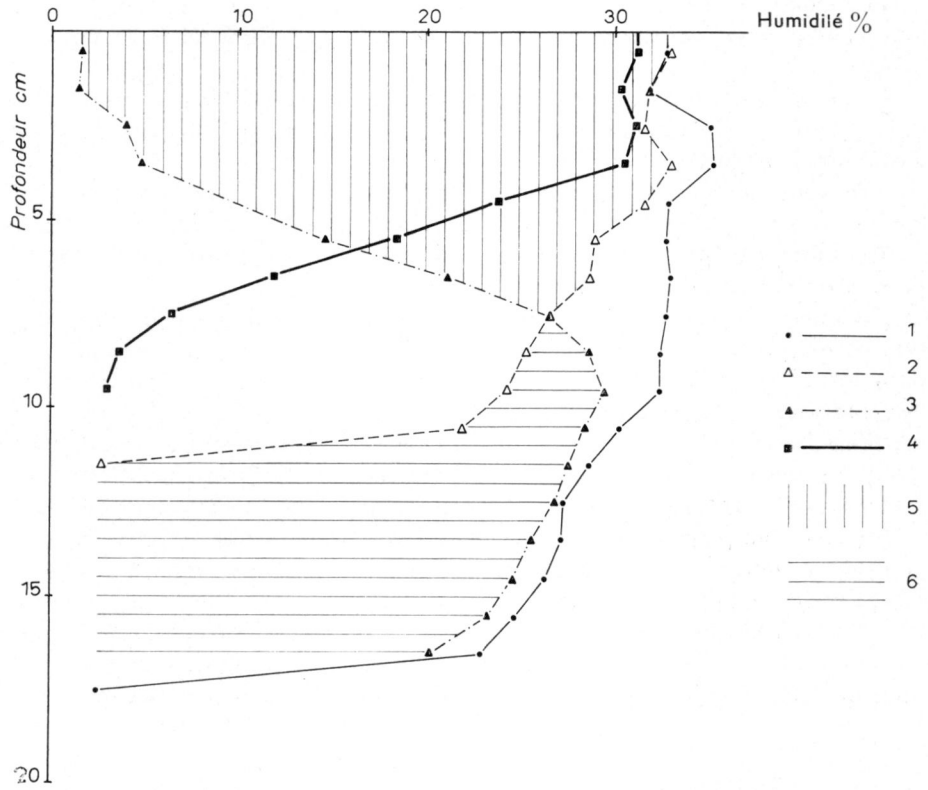


FIG. 30. — *Vérification expérimentale de l'effet de pénétration « en coin ».*
1 : profil hydrique final (h_t) ;
2 : profil hydrique initial (h_i) ;
3 : eau préexistante dans le profil hydrique final (h_p) ;
4 : solution (h_s) ;
5 : eau pure initiale déplacée ;
6 : eau pure initiale apportée.

par un effet de « coin », avec une pointe avancée vers le bas. Cette expérience tend donc à confirmer les schémas que nous avons proposés pour le processus d'infiltration.

Les résultats de cet essai permettent même de pousser l'analyse du phénomène un peu plus loin, et de voir notamment où se retrouve l'eau contenue initialement

[1] Cette hypothèse a été vérifiée expérimentalement. Nous avons saturé d'eau pure par ascension capillaire quatre colonnes de sol de 5 cm de haut. Ensuite deux de ces colonnes ont été placées sur un verre de montre contenant une solution de $CaCl_2$ à 1 p. 100 et maintenues ainsi pendant 5 h. Ensuite on a prélevé la terre par couches de 1 cm. Le dosage du chlore a montré que seule la couche inférieure, qui plongeait partiellement dans la solution, a été enrichie en Cl. Dans les autres couches les teneurs en Cl sont les mêmes que dans le témoin qui n'a pas été au contact de la solution.
Cet essai confirme que la diffusion du sel n'intervient pas dans le temps considéré.

dans le profil (c'est-à-dire avant l'apport de la solution). Nous aborderons ce problème suivant la méthode utilisée par TSCHAPEK (1) (1961).

Soit une couche dont l'humidité totale, à l'issue de l'arrosage par l'eau puis la solution, est h_t et dont l'humidité initiale (avant l'apport de chlorure) était h_i. L'eau apportée est h_s. L'eau préexistante de cette couche est $h_p = h_t - h_s$. En comparant h_p à h_i, nous pouvons établir le sort subi par l'eau initialement contenue à ce niveau.

Si $h_p < h_i$, la différence entre ces deux valeurs indique la quantité d'eau initiale *expulsée* ou *déplacée* par la solution. Si $h_p > h_i$, la différence indique la quantité d'eau initiale *apportée*, provenant des couches supérieures.

Ne pouvant matériellement déterminer h_i sur la même colonne, nous avons fait un essai complémentaire avec une dose d'arrosage de 30,4 mm et une intensité de 0,156 mm/mn. Cet essai a donc reproduit à peu de chose près la distribution de l'eau *avant* l'apport de la solution.

Il apparaît (fig. 30) que l'eau initiale a été déplacée par la solution. Le remplacement est presque complet dans les couches superficielles, puis diminue avec la profondeur. La zone d'humectation finale est constituée par de l'eau initiale déplacée des couches supérieures.

Vers le milieu du profil se trouve une couche qui ne subit pas de modification quant à sa teneur en eau initiale tout en étant enrichie par la solution. Cette tranche « pivot » délimite deux zones distinctes : à l'amont interviennent simultanément le drainage (eau préexistante déplacée) et l'humectation par la solution. En dessous se situe au contraire une zone soumise uniquement à l'humectation, aussi bien par l'eau déplacée que par la solution.

Tout se passe donc comme si l'effet de « coin » s'accompagnait d'un effet « piston » qui fait progresser l'eau vers le bas par un mouvement de proche en proche. C'est ainsi que la zone d'humectation se déplacerait apparemment par translation.

(1) Que cet auteur, qui a bien voulu nous initier à sa méthode d'interprétation et de calcul, trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

CHAPITRE V

ÉTUDE DE QUELQUES VALEURS SPÉCIFIQUES

Nous avons montré dans les chapitres précédents que lorsque l'intensité d'arrosage varie, la vitesse d'avancement du front ainsi que l'humidité de la zone intermédiaire du profil sont affectées. La vitesse est reliée à l'intensité par une relation moins que proportionnelle, mais pour les faibles intensités la relation est linéaire. De même l'expérience a montré que, pour certains sols, l'humidité de la zone intermédiaire est indépendante de l'intensité lorsque celle-ci est faible. Ce fait nous a permis de définir *l'humidité minima à l'infiltration*. Sa connaissance peut être utile pour la mise en œuvre de l'irrigation par aspersion. Nous allons voir comment cette grandeur se déduit des relations $V = f(I)$, et comment elle se situe par rapport à la capacité au champ.

La même relation permet également de calculer, par extrapolation, la valeur de *la capacité maxima d'absorption* (ou intensité maxima admissible) d'un sol, notion extrêmement importante pour l'étude du ruissellement et de l'érosion.

Pour déterminer ainsi, à partir de l'équation (6)

$$V = V_t\ (1 - e^{-\mu I})$$

des valeurs spécifiques de l'humidité du sol, ou de l'intensité d'arrosage, il faut que l'humidité soit reliée aux variables I et V d'une façon simple. C'est cet aspect que nous allons donc considérer en premier lieu.

A. L'humidité du sol peut être calculée par le rapport I/V

Le processus simplifié d'infiltration, exposé au début du chapitre III, indique que la zone d'humectation du profil est complètement formée lorsque la vitesse du front devient constante ($z_f = z_i$). Ensuite pour chaque unité de temps une hauteur d'eau ΔI se répartit sur une longueur ΔV de la colonne de terre. Par conséquent $\Delta I/\Delta V$ mesure la fraction de volume de sol occupée par l'eau. I et V restant inchangés, $\Delta I/\Delta V = I/V =$ constante. Donc au fur et à mesure que l'arrosage se poursuit et que le front progresse, la zone d'humectation pénètre dans le sol en laissant derrière elle une zone à *humidité constante* qui s'allonge. Le taux de remplissage (en volume) de cette dernière est donc mesuré par le rapport I/V.

Pour obtenir l'humidité totale en volume (h_v), il convient d'ajouter à ce taux de remplissage la teneur en eau du sol (h'_v) avant arrosage. On peut donc écrire :

$$h_v = I/V + h'_v$$

où h_v et h'_v sont des *fractions* de volume occupé par l'eau dans le sol.

Le pourcentage d'humidité pondéral est facilement obtenu en multipliant ces données par 100 et divisant par la densité apparente. On a ainsi :

$$h\ \% = \frac{100}{\Delta a}.\ I/V + h_i\ \%$$

où h % : pourcentage pondéral d'humidité de la zone intermédiaire ;
h_i % : pourcentage pondéral d'humidité de la terre séchée à l'air *avant* arrosage ;
Δ_a : densité apparente g/cm³.

Cette relation permettrait de calculer facilement, pour un couple de valeur I et V, l'humidité de la zone intermédiaire. Nous l'avons appliquée à nos essais et les résultats sont donnés dans le tableau 9. L'accord est généralement bon : la plupart des valeurs calculées sont encadrées par les humidités expérimentales extrêmes correspondantes. Rubin et *al.* (1964) ont trouvé le même résultat. On ne peut d'ailleurs s'attendre à un accord tout à fait rigoureux : l'expérience a montré que d'une part la zone intermédiaire n'est pas toujours définie par une humidité constante, et d'autre part les longueurs z_i et z_f sont rarement identiques. Néanmoins, les données montrent que le rapport I/V permet une estimation correcte de la teneur en eau du sol. Il est donc légitime de se fonder sur cette appréciation pour établir et discuter les valeurs spécifiques découlant de la relation générale entre V et I.

Dans ces conditions, l'équation (6) indique la variation de la saturation du profil lorsque l'intensité croît d'un essai à l'autre. En effet plus le coefficient μ est grand, plus la courbe (V, I) est aplatie sur l'axe des I (chap. II). Donc plus μ est grand, plus le rapport I/V, et par conséquent la saturation du profil, croissent rapidement avec I. Ainsi μ est un coefficient indiquant la tendance d'un sol à s'engorger (ou à se saturer) sous l'effet de pluies d'intensités de plus en plus élevées.

B. L'humidité minima à l'infiltration

On a constaté qu'avec un certain nombre des sols étudiés, il existe une gamme de faibles intensités d'arrosage dans laquelle l'humidité de la zone intermédiaire est pratiquement constante. Cette valeur définit l'humidité minima à l'infiltration.[1]

1° *Mesure de l'humidité minima à l'infiltration*

Nous avons vu (chap. II) que sur la courbe expérimentale (V,I) il peut exister deux ou trois points alignés sur une droite passant par l'origine. Cette droite a pour pente le rapport moyen V/I des points considérés. L'inverse de la pente de cette droite (I/V) définit un taux de remplissage constant, indépendant de I, qui correspond à l'humidité minima à l'infiltration. On peut donc calculer, d'après la méthode

[1] Cf. chap. III, C, 2°, p. 171.

TABLEAU 9

Zone intermédiaire des profils hydriques.
Comparaison entre les valeurs calculée et expérimentale de l'humidité

Sol		Arrosage			Front (vitesse mm/mn)	Profil (humidité % poids)	
Origine	Densité apparente	Intensité (mm/mn)	Dose (mm)	Profondeur humectée (cm)		Calculée par I/V	Mesurée (valeurs extrêmes de la zone intermédiaire)
Closeaux 15 — 25	1,20	0,355	86,9	26,0	0,977	31,8	34 — 35
		0,184	74,5	22,6	0,508	32,1	31 — 33
		0,123	68,6	22,5	0,370	29,2	28 — 30
		0,078	39,8	14,5	0,279	25,3	26 — 27
		0,029 7	40,2	16,2	0,111	24,4	25 — 26
		0,017 8	59,5	23,6	0,060	26,4	25 — 27
Closeaux 50	1,20	0,196	82,5	22,0	0,508	35,6	35 — 37
		0,123	73,7	22,0	0,33	34,0	31 — 34
		0,052 2	74,3	23,0	0,157	31,0	31 — 33
		0,021 3	65,8	23,8	0,0682	28,9	28 — 29
		0,018 9	64,5	20,0	0,064	28,0	28 — 30
Grimari 0 — 15	1,20	0,140	70,8	20,2	0,379	32,6	31 — 33
		0,125	61,3	17,8	0,337	32,4	31 — 33
		0,054	78,4	24,0	0,160	29,8	29 — 31
		0,014	64,6	21,3	0,045	27,6	27 — 30
Grimari 15 — 30	1,20	1,673	298	64	3,17	45,1	38 — 40*
		0,784	301	67,2	1,80	37,5	38 — 39
		0,112	59	16,2	0,313	31,2	30 — 32
		0,049	69,9	20,7	0,133	31,7	31 — 33
Grimari 15 — 30 (mottes)	0,90	0,643	64,3	24	2,37	31,2	29 — 31
		0,286	48,7	19,5	1,145	29,8	28 — 30
		0,082	40,5	18	0,350	27,4	27 — 28
		0,045	64,4	28	0,189	27,2	27 — 29
Pierre-Plate 15	1,25	0,75	188	51,1	2,00	30,5	30 — 31
		0,42	170	50,1	1,237	27,7	28 — 29
		0,205	63,6	22,2	0,675	25,1	25 — 26
		0,077 5	125	47	0,28	22,7	22 — 23
		0,027 4	63,7	28	0,12	19,1	20 — 21
Pierre-Plate 45	1,25	0,506	74,8	25,5	1,651	24,9	25 — 26
		0,41	67,7	24,2	1,468	22,9	24 — 25
		0,195	58,7	23,0	0,702	22,7	23 — 24
		0,084	42,9	19,2	0,384	18,0	20 — 19
		0,035 3	46,8	23,1	0,164	17,8	17 — 19
H. B. cases	1,20	0,337	52,6	14,4	0,865	35,1	33 — 35
		0,156	50,6	15,4	0,45	31,2	30 — 31

* Redistribué à l'issue de l'arrosage.

indiquée précédemment, l'humidité minima d'après les rapports I/V des points expérimentaux alignés avec l'origine.

En outre, il a été montré (tabl. 5) que si on considère l'équation (6).

$$V = V_l (1 - e^{-\mu I})$$

la tangente à l'origine (ayant pour pente μV_l) est pratiquement confondue avec les points expérimentaux alignés. On peut donc, toujours selon la même méthode, calculer l'humidité minima à partir de $1/\mu V_l$.

Les deux séries de calculs ont été effectuées pour nos sols (tabl. 10).

TABLEAU 10

Humidité minima à l'infiltration

(en p. 100 de poids, humidité initiale incluse)

Sol	Calculée par		Profils expérimentaux pratiquement indépendants de I	Humidité minima définie
	Rapport I/V des points expérimentaux	$1/\mu V_l$ (1)		
Closeaux 15 — 25...	25,3 — 24,4 — 26,4	— (2)	oui	*sensu stricto*
Closeaux 50	28,9 — 28,0	29,4 — 29,1	oui	*s. s.*
Grimari 0 — 15.....	27,6	28,3	non	*sensu lato*
Grimari 15 — 30....	31,2 — 31,7	31,4	oui	*s. s.*
Grimari (mottes)	27,4 — 27,2	28,0	oui	*s. s.*
Pierre-Plate 15	19,1 — 22,7	24,4 — 22,6	non	*s. l.*
Pierre-Plate 45	18,0 — 17,8	— (2)	non	*s. l.*
Hor. B. cases	— (3)	28,5	— (3)	*s. l.*

(1) Pour deux des sols, calcul effectué avec deux couples de paramètres μ et V_l, provenant de deux ajustements.

(2) Les paramètres de la fonction exponentielle n'ont pas été ajustés.

(3) Pas d'essais à faible intensité d'arrosage.

On constate en premier lieu qu'avec le calcul par I/V des points alignés (Closeaux 15 — 25 et 50, Grimari 15 — 30 terre fine et mottes, Pierre-Plate 45) les différentes valeurs obtenues sont extrêmement groupées pour un sol donné, ce qui est d'ailleurs une conséquence naturelle de l'alignement des points. Théoriquement, ces valeurs doivent correspondre à des profils hydriques pratiquement superposés dans la zone intermédiaire. Ce point est vérifié pour tous ces sols sauf Pierre-Plate 45 (sableux fin).

En second lieu nous constatons pour ces mêmes matériaux une excellente correspondance entre les valeurs de l'humidité minima à l'infiltration calculées d'après la tangente à l'origine et celles calculées par I/V. On peut ainsi extrapoler l'humidité minima à partir de points quelconques de la courbe (V, I,) après avoir ajusté sur ces points les paramètres μ et V_l.

2° *Extension de la définition de l'humidité minima à l'infiltration*

Donc pour trois de nos sols, ainsi que pour le système en mottes, l'humidité minima est bien définie expérimentalement et peut être calculée par des voies différentes. Pour les autres cas l'examen des résultats ne permet pas de tirer une conclusion aussi nette. Mais par extension, et pour fixer un ordre de grandeur de l'humidité du sol aux très faibles intensités d'arrosage, nous considérerons comme humidité minima (*sensu lato*) la valeur calculée à partir soit de la tangente (Grimari 0 — 15 Pierre-Plate 15, Hor B), soit de points V, I alignés (Pierre Plate 45). Ceci nous donne une valeur indicative (probablement surestimée si on en juge d'après l'exemple de Pierre-Plate 15[1]) qui permet de comparer les sols entre eux.

3° *Classement des sols étudiés d'après l'humidité minima à l'infiltration*

Si on classe les différents sols étudiés, on trouve, dans l'ordre des humidités minima décroissantes : le sous-sol argilo-sableux (Grimari 15 — 30), les sous-sols limono-argileux (Closeaux 50 et Hor B), le sol argilo-sableux (Grimari 0 — 15), le sol

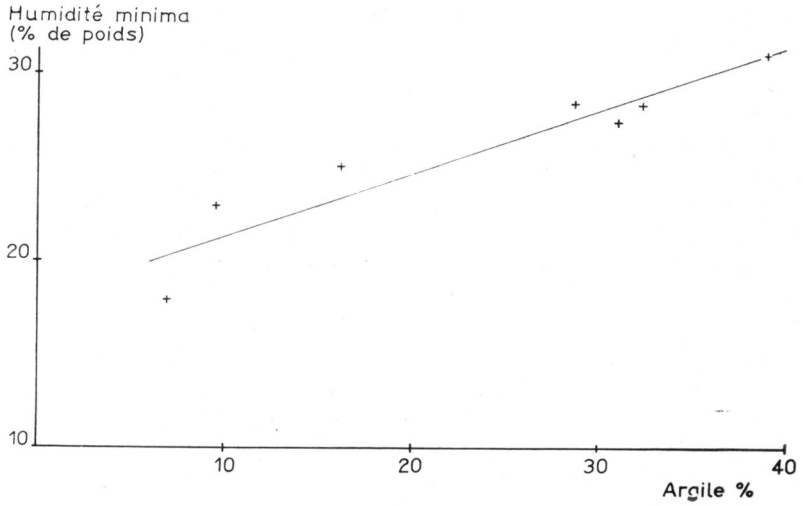


FIG. 31. — *Relation entre l'humidité minima à l'infiltration et la teneur en argile des sols.*

limoneux (Closeaux 15 — 25), le sol sableux organique (Pierre-Plate 15) et enfin le sous-sol sableux non organique (Pierre-Plate 45). Ce classement est celui des *teneurs en argile* décroissantes (fig. 31). La teneur en limon (2 — 20 microns) ne semble pas intervenir dans ce classement.

On retrouve là l'effet, souvent noté, de la teneur en argile sur les propriétés et les constantes hydriques du sol. Il y a certainement dans cette convergence une justification complémentaire de la notion d'humidité minima à l'infiltration.

(1) cf. Valeurs expérimentales, tabl. 9, p. 243.

4° *Position de l'humidité minima à l'infiltration sur les courbes de redistribution. Relation avec la capacité au champ*

Après l'arrosage l'eau se *redistribue*, c'est-à-dire que le front continue à progresser tandis que l'humidité à chaque niveau décroît. Ce phénomène se produit sans que l'évaporation intervienne. Il correspond à ce que les praticiens appellent le « ressuyage » d'une terre humide.

Nous avons montré (FEODOROFF, 1962) qu'à chaque profondeur, l'humidité tend assez rapidement vers la valeur de la capacité au champ. Ensuite les mouvements sont très ralentis, parfois même imperceptibles (DOLGOV, 1948). Une méthode simple, qui reproduit ces phénomènes de façon accélérée, permet d'apprécier la vitesse de redistribution à différents niveaux d'humidité, compris *grosso modo* entre la saturation et le point de flétrissement (FEODOROFF, 1964). Pour préciser la mobilité de l'eau correspondant à l'humidité minima, il apparaît donc utile de situer cette valeur sur les courbes de redistribution.

Ces courbes (fig. 32 et 33) ont été établies en portant en abscisses l'humidité et en ordonnées la variation d'humidité en fonction du temps, $\Delta h/\Delta t$, comptée positivement (cf. annexe II). On peut distinguer trois régions dans le sens des humidités croissantes :

1. Une région à faible variation de $\Delta h/\Delta t$ en fonction de $\bar{h}$. Les points sont pratiquement alignés sur une droite de faible pente, presque confondue avec l'axe des $\bar{h}$.

2. Une région intermédiaire qui affecte suivant les sols des formes différentes. Ou bien les points s'alignent sur une droite de pente plus forte que précédemment (Hor B) ; ou bien ils se répartissent autour d'une courbe en forme de cloche : parmi les terres étudiées c'est le cas notamment de Grimari 0 — 15. Soit enfin les points forment un nuage difficilement assimilable à une courbe quelconque (Pierre-Plate 45).

3. Une région à très forte variation de $\Delta h/\Delta t$ avec l'humidité pour des teneurs en eau élevées. Cette zone exprime la mobilité de plus en plus grande de l'eau lorsque l'humidité approche de la saturation.

Pour les sols étudiés ici, ainsi que pour d'autres que nous avons expérimentés, la valeur de la capacité au champ se situe à la limite entre la branche linéaire des faibles humidités et la région immédiatement contigue vers les humidités croissantes.

Dans tous les cas étudiés l'humidité minima est plus élevée que la capacité au champ. Pour trois des sols elle est située dans la région intermédiaire (Pierre-Plate 15, Grimari 15 — 30, Closeaux 15 — 25). Pour deux autres (Grimari 0 — 15, Closeaux 50) elle se trouve à la limite de la région intermédiaire et de la zone à mobilité de l'eau rapidement croissante. Elle est très voisine de la capacité au champ pour le sol sableux non-organique (Pierre-Plate 45) et pour l'horizon B (dont la capacité au champ mesurée en place est certainement surestimée).

Ces résultats impliquent que même à l'issue d'un arrosage de très faible intensité, l'humidité du sol ne se trouve pas à un état d'équilibre et qu'elle est susceptible de continuer à migrer en profondeur. On peut raisonnablement prévoir que cette redistribution sera d'autant plus faible que l'humidité minima est voisine de la capacité au champ.

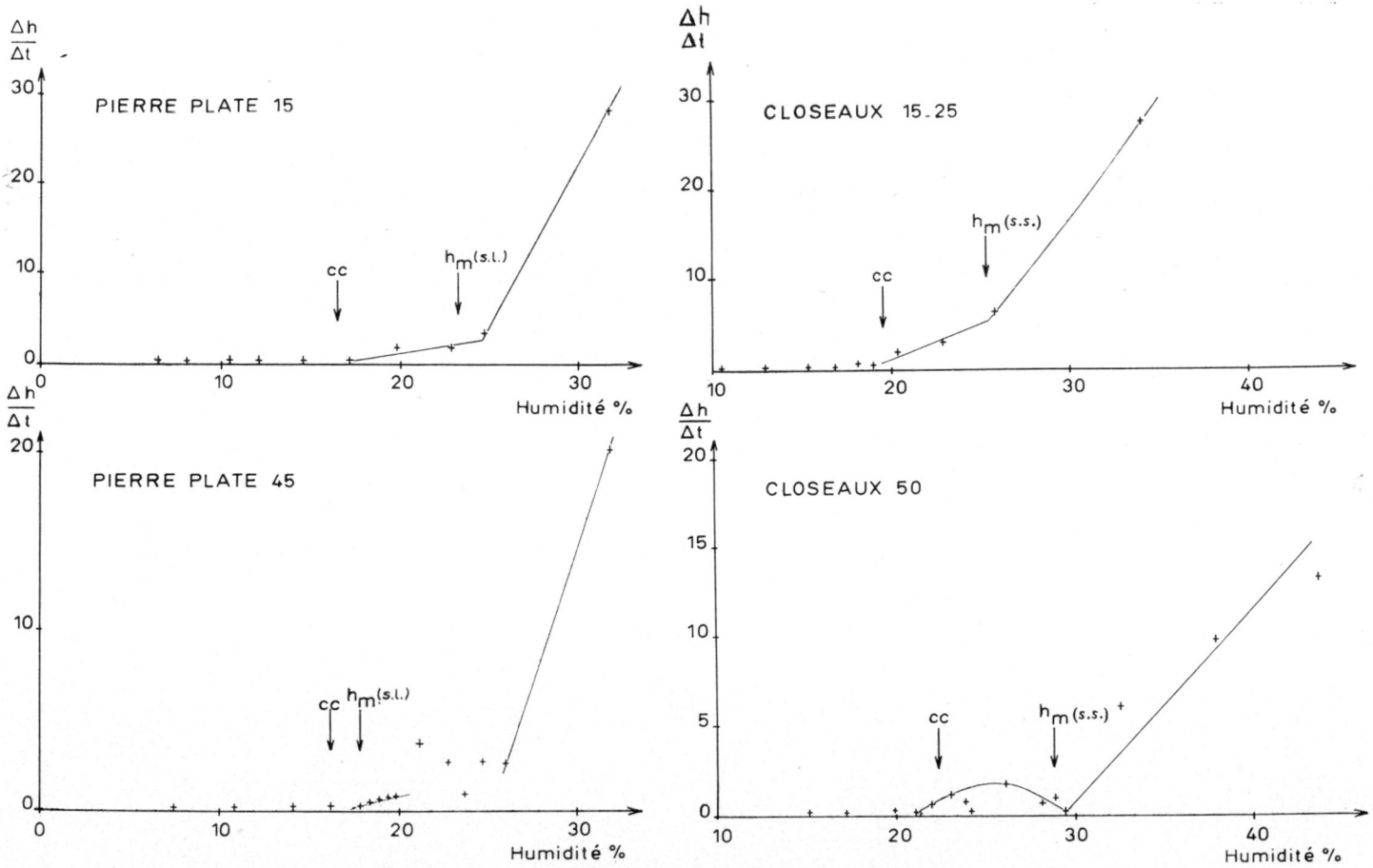


FIG. 32. — *Courbes de redistribution.*
cc : capacité au champ ; hm : humidité minima à l'infiltration ; *ss : sensu stricto ; sl : sensu lato*
La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport I/V (cf. chap. V).

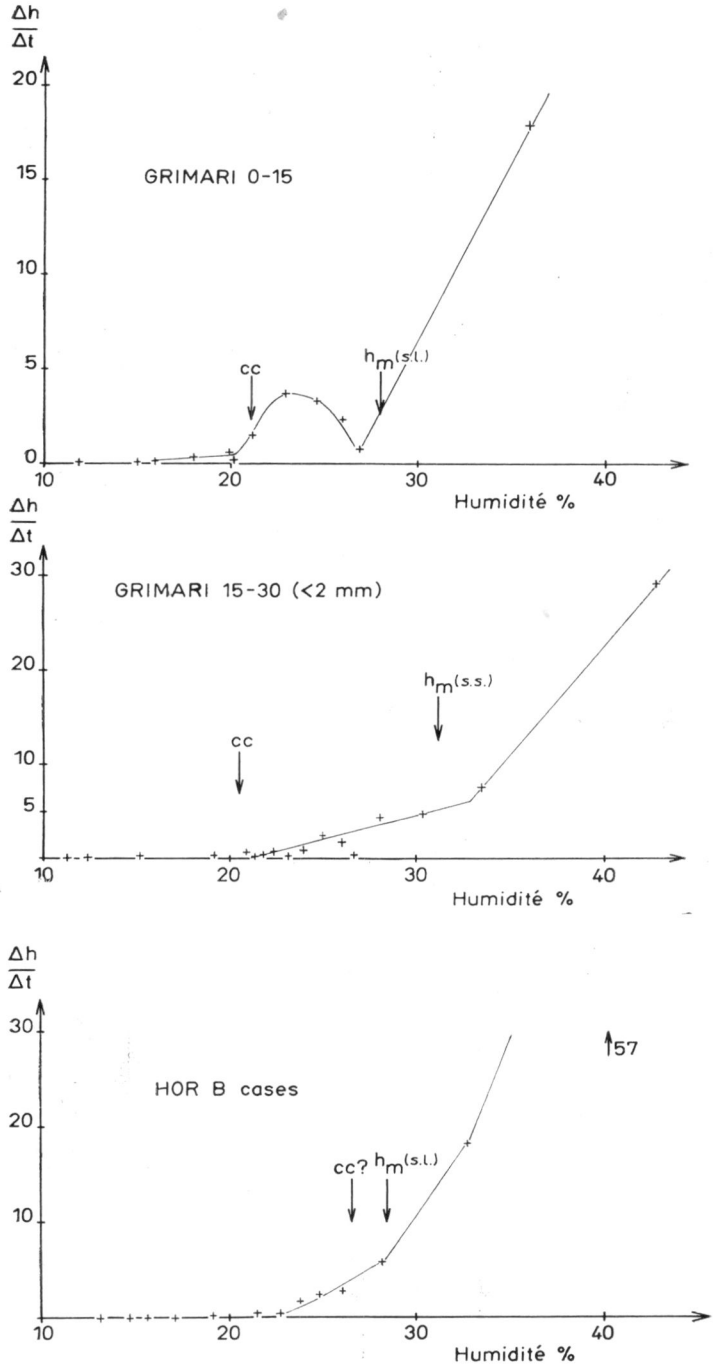


FIG. 33. — *Courbe de redistribution.*

cc : capacité au champ ; hm : humidité minima à l'infiltration ; *ss : sensu stricto ; sl : sensu lato.*

La flèche indique la valeur calculée d'après le rapport 1/V (cf. chap. **V**).

5° *Conclusions*

L'existence d'une humidité minima d'infiltration comporte des conséquences théoriques et pratiques.

Il apparaît en effet que dans un sol sec l'eau ne se déplace pendant l'arrosage que lorsqu'un remplissage minimum est assuré dans la zone intermédiaire. Comme ce remplissage minimum est supérieur à la capacité au champ, on est amené à penser que dans cette zone, il doit y avoir de l'eau relativement mobile en même temps que de l'eau notablement retenue.

Dans la pratique de l'irrigation par aspersion, on cherche généralement à ce que le sol ne soit pas gorgé d'eau, de façon à limiter les pertes par évaporation et éviter que la plante ne souffre d'asphyxie temporaire (qui peut d'ailleurs se prolonger lorsque la redistribution est entravée, avec un sous-sol imperméable par exemple). Par conséquent, il serait utile d'arroser avec des intensités telles que le sol soit à l'humidité minima. Pour cela il faut se situer en deça d'une certaine *intensité critique*.

C. L'intensité critique d'arrosage

Cette grandeur est définie à partir de l'humidité minima d'infiltration : c'est l'intensité au-dessus de laquelle la teneur en eau de la zone intermédiaire du profil dépasse la valeur de l'humidité minima.

La valeur de l'intensité critique (I_c) est appréciée sur les courbes expérimentales (V, I.) Elle correspond à la valeur de I pour laquelle V et I cessent d'être proportionnels. Elle est définie avec plus ou moins de précision suivant l'intervalle qui sépare les différents points sur le graphique. Les valeurs de l'intensité critique pour les sols étudiés sont approximativement les suivantes :

Sol	*Intensité critique d'arrosage*	
	(mm/mn)	(mm/h)
Closeaux 15 — 25	0,1	6
Closeaux 50	0,03 à 0,05	1,8 à 3
Pierre-Plate 15	0,1 à 0,2	6 à 12
Pierre-Plate 45	0,1 à 0,2	6 à 12
Grimari 0 — 15	0,02 à 0,05	1,2 à 3
Grimari 15 — 30	> 0,2	> 12
Grimari 15 — 30 mottes	~ 0,2	~ 12

Les sols ne se classent pas dans le même ordre que pour la valeur de l'humidité minima. L'intensité critique la plus élevée se trouve pour le sous-sol stable de Grimari. Ensuite viennent les sols sableux suivis du limon de surface. En dernière position viennent le sous-sol limono-argileux et le sol ferrallitique de surface. Il n'apparaît pas de relation entre l'intensité critique et les propriétés telles que la texture, la stabilité structurale ou l'état d'agrégation.

De toute façon l'intensité critique est assez variable suivant les matériaux. Dans une pratique rationnelle de l'aspersion, on devrait en tenir compte pour limiter la redistribution ultérieure, généralement accompagnée d'une évaporation, d'autant plus forte que le sol est plus humide (FEODOROFF et RAFI, 1962). On pourrait tendre vers ce résultat en déterminant préalablement, au laboratoire, la valeur de I_c et en fixant le débit des aspersions de façon à ne pas la dépasser.

D. Intensité maxima admissible (capacité limite d'absorption)

La capacité limite d'absorption est l'intensité pluviale maximum qui peut s'infiltrer dans le sol sans que la saturation (suivie généralement de ruissellement) n'apparaisse en surface. Elle est exprimée comme une pluie en mm/h. Cette notion est utilisée en hydrologie superficielle pour prévoir la quantité d'eau ruisselée sur un bassin à l'issue d'une pluie donnée. Connaissant la fréquence des pluies, on cherche à déterminer ainsi la fréquence et l'importance des crues.

Généralement, on calcule la capacité limite d'absorption *a posteriori* : sur un hyétogramme (diagramme intensité-durée de pluie) on déduit l'aire correspondant à la quantité d'eau effectivement ruisselée, mesurée par ailleurs. BOUCHARDEAU et RODIER (1960) ont montré que la capacité limite dépend de l'humidité initiale du terrain et ont modifié la méthode d'évaluation pour tenir compte de la quantité d'eau qui imbibe le sol. Ces méthodes sont indirectes car elles impliquent la mesure *in situ* du ruissellement.

Une méthode plus directe a été proposée par RIOU (1963), qui a procédé à des essais de laboratoire. En arrosant un sol avec des intensités différentes, il a constaté que le ruissellement intervient d'autant plus rapidement que la pluie est forte. Cet auteur a établi une relation entre l'intensité I de la pluie et la durée t_o pendant laquelle l'eau est absorbée sans ruissellement : $I\sqrt{t_o} =$ constante. Ce résultat implique que pour une pluie d'intensité quelconque il arrive toujours un moment où le sol est saturé. C'est en contradiction avec nos propres essais où des pluies de très longue durée ont été appliquées sans qu'il se forme de lame d'eau en surface. Il semble donc utile de reconsidérer ce problème.

Il découle implicitement des résultats de RIOU que pour une pluie d'intensité constante, la distribution de l'eau à chaque niveau augmente avec le temps, c'est-à-dire avec la quantité totale d'eau infiltrée. Mais l'observation de profils hydriques obtenus avec des doses d'arrosages différentes montre que la zone intermédiaire s'allonge sans que sa teneur en eau soit affectée : à cet égard les résultats de RUBIN *et al* (1964) confirment les nôtres.

Nous allons donc calculer, à partir de nos données, l'intensité maxima d'arrosage (I_{max}) qui conduit à la saturation totale de la zone intermédiaire. Comme une intensité encore plus forte entraînerait la sursaturation et donc le refus d'absorption (suivi de ruissellement), nous considérons que I_{max} s'identifie à la capacité limite d'absorption.

Rappelons que pour un essai donné, le rapport I/V (V étant la vitesse constante du front) définit le taux de remplissage moyen du sol (en fraction de volume). Lorsque ce taux égale la saturation, il est raisonnable d'écrire

$$I_{max} = pV_{max} \qquad (7)$$

p étant la porosité (cc/cc).

TABLEAU II

Intensité maxima d'arrosage

Sol	Porosité p (cm^3/cm^3)	Valeurs calculées			Contrôle expérimental					
								Zone intermédiaire du profil réel		
		μ (1) (mn/mm)	I_{max} (mm/mn)	V_{max} (mm/mn)	Intensité appliquée I (mm/mn)	Vitesse mesurée V (mm/mn)	% de saturation $\left(\frac{100 \cdot I}{V \cdot p}\right)$	humidité h $cm^3/100\ cm^3$	% de saturation h/p	Profondeur totale humectée (cm)
Closeaux 50	0,555	2,17 3,0	0,58 0,43	1,05 0,77	0,56	1,34	75	~ 47	85	26,7
Grimari 0 — 15	0,555	2,12	0,55	0,99	0,52	1,31	72	~ 45	81	26,5
Grimari 15 — 30	0,555	0,49	1,94	3,50	1,67 1,81	3,17 —	53 refus d'absorption	—	—	63,5 10,0
Grimari 15 — 30 (mottes)	0,677	0,11	24,6	36,4	—	—	—	—	—	—
Pierre-Plate 15	0,537	0,66 1,07	2,11 1,48	3,8 2,75	1,80	4,31	78	~ 47	87	27,5
Hor. B.	0,555	1,38	0,95	1,7	—	—	—	—	—	—

(1) Pour la détermination de μ, cf. chap. II, c, 3.

En effet le volume maximum accessible à l'eau ne peut dépasser la porosité totale. Cette expression représente donc une limite théorique.

En portant cette valeur de I_{max} dans l'équation (6), on obtient

$$1 - V_{max}/V_l = e^{-\mu p V max}$$

Comme μ, V_l et p sont connus, on pose $e^{-\mu p} = A$ et on calcule séparément les deux membres de l'équation pour différentes valeurs de V_{max} jusqu'à ce que la différence soit très voisine de O. La valeur de V_{max} répondant à cette solution permet de calculer I_{max} par l'équation (7).

Les valeurs trouvées par ce calcul sont données dans le tableau 11. On constate que I_{max} est pour la plupart des sols compris entre 0,5 et 2,0 mm/mn, soit 30 et 120 mm/h, ce qui correspond à des intensités moyennes maxima d'averses de courte durée dans la région parisienne (GRISOLLET *in* REMENIERAS, 1960). Les vitesses maxima V_{max} ainsi calculées sont naturellement plus faibles que V_l de l'équation 6 : le rapport V_{max}/V_l se situe entre 0,6 et 0,8

Nous avons cherché à vérifier expérimentalement la validité des valeurs maxima ainsi calculées. A cet effet, nous avons exécuté des essais complémentaires d'infiltration, en prenant I_{max} comme intensité réelle d'arrosage. Pratiquement les intensités expérimentales se sont trouvées légèrement inférieures (tabl. 11). La vitesse du front correspondante est par contre, assez nettement supérieure à V_{max}. On retrouve là le fait déjà noté plus haut que la croissance de V en fonction de I est légèrement plus forte que ne le laisse prévoir l'équation (6).

Comme conséquence la saturation du profil, calculée d'après le rapport I/V et ramenée à la porosité totale, se trouve être inférieure à 100. Cependant comme nous l'avons déjà vu (tabl. 6), avec les arrosages intenses I/V donne une valeur sous-estimée de la zone intermédiaire, car la vitesse du front devient constante *avant* que la zone d'humectation ne soit formée. Le taux de saturation réel est effectivement plus élevé. Il se situe entre 81 et 87 p. 100 pour les trois sols étudiés. C'est l'ordre de grandeur de la saturation de la zone intermédiaire rapporté par différents auteurs ayant effectué des essais d'infiltration sous charge. ENGELHARD (1928-1929) a indiqué que même en immergeant un sol dans l'eau on ne peut saturer que 80 p. 100 de la porosité. En effet, KING (1898) avait jadis montré que dans le cas de l'infiltration une partie de la macroporosité devait rester vide d'eau pour permettre à l'air de s'échapper. Nous estimons donc que ces intensités expérimentales, légèrement inférieures à I_{max} calculé, entraînent une saturation voisine du maximum admissible dans la zone intermédiaire. Par conséquent I_{max} donne une estimation correcte de la capacité limite.

Avec le sous-sol de Grimari (15 — 30), les deux valeurs expérimentales de I (1,67 et 1,81 mm/mn) encadrent certainement la valeur réelle de la capacité limite d'absorption : pour la plus faible intensité le sol a accepté l'arrosage sans refus pendant plus de trois heures, alors qu'avec la plus forte (1,81) un plan d'eau s'est formé en surface au bout de 53 mn. Donc, pour ce sol, la valeur calculée de I_{max} (1,94) est légèrement plus forte que la capacité limite d'absorption.

On voit donc que le calcul de I_{max} à partir des paramètres μ et V_l permet d'apprécier la capacité limite d'absorption. Ce résultat est d'autant plus remarquable qu'il s'agit d'une très large extrapolation, les calculs ayant été conduits avec des couples

μ, V_l ajustés sur des points expérimentaux obtenus pour des intensités très nettement inférieures à I_{max}.

E. Conclusions : possibilité d'application pratique

La connaissance de la relation entre la vitesse d'avancement du front et l'intensité d'arrosage permet de calculer des valeurs spécifiques dont on pourrait tenir compte dans les projets d'aménagements hydrauliques.

L'humidité minima d'infiltration, obtenue lorsque la pluie ne dépasse pas une intensité critique, pourrait être l'objectif vers lequel devrait tendre une aspersion bien conduite.

L'intensité maxima d'infiltration permet d'estimer la capacité limite d'absorption : l'intérêt de cette grandeur n'est plus à démontrer pour les problèmes de ruissellement et d'érosion. Si on ne peut modifier la pluie, on peut intervenir sur certaines propriétés du sol, comme la structure, pour éloigner le risque. Nous évoquerons ce problème au chapitre suivant.

Une série d'expériences simples effectuées en laboratoire permet de calculer ces valeurs spécifiques avec une approximation suffisante pour les besoins de l'application.

CHAPITRE VI

EFFETS DE L'ÉTAT STRUCTURAL SUR L'INFILTRATION

Dans la mesure où l'infiltration est régie pour une grande part par les dimensions et la distribution des pores, il est prévisible qu'une modification de la porosité influencera ce phénomène. On peut même supposer qu'une réduction du nombre des petits pores doit conduire à une infiltration plus rapide, comme le laissent entendre les schémas que nous avons proposés (chap. IV). Nous avons donc cherché à le vérifier expérimentalement.

Pour modifier la porosité, nous avons fait varier les dimensions et l'empilement des particules d'un sol. Les résultats de TAMBOLI (1961), confirmés par nos observations, montrent que pour un sol donné les courbes de pF et donc la distribution des pores, dépendent de la dimension des agrégats. C'est pourquoi nous avons comparé l'infiltration dans un sol préalablement émietté et dans le même sol sous forme de mottes calibrées, de dimensions comprises entre 5 et 10 mm. Dans le premier système la densité apparente est 1,20 et la porosité totale 0,55. Dans le second, la densité apparente est 0,90, la porosité totale est 0,68, mais les mottes elles-mêmes ont une porosité [1] de 0,37, le reste étant constitué par les vides entre elles. On a donc des raisons de penser qu'à l'intérieur du matériau en agrégats, le nombre de pores relativement fins est plus réduit que dans le matériau tamisé, constitué de grains de petites dimensions et tassés.

Pour limiter les effets de la modification de la porosité par le contact de l'eau, cette comparaison a été effectuée avec une terre de bonne stabilité structurale, le sous-sol ferrallitique de Grimari (15 — 30).

A. Effets sur le processus d'infiltration

1° *Pour une intensité d'arrosage donnée*

Nous constatons que la vitesse d'avancement du front est plus grande pour le matériau structuré (fig 11).

Les profils hydriques permettent également une distinction (tabl. 8) : la différence d'humidité entre le front et la zone intermédiaire est plus faible avec le sol en mottes

[1] La mesure à été effectuée à l'aide d'un voluménomètre à mercure sur des mottes individualisées et par conséquent ce nombre ne concerne que les vides à l'intérieur des mottes.

(environ 5 p. 100 de la terre sèche) qu'avec le sol tamisé (environ 10 p. 100). Tout se passe comme si, à l'arrière du front, les prélèvements latéraux et donc l'effet de « freinage » étaient plus réduits avec le sol en mottes. La vitesse de pénétration accrue serait une conséquence de cet état de choses. Cela confirme notre façon d'imaginer le processus d'infiltration (chap. IV).

2° Pour des intensités croissantes

Le sol en mottes se distingue nettement du sol fin. La vitesse du front croît plus vite lorsque la structure est agrégée ($\mu = 0{,}11$ au lieu de 0,49). Cependant l'humidité du front et le gradient d'humidité au niveau de ce dernier sont presque constants alors que l'intensité augmente (fig. 23). C'est d'ailleurs ce résultat qui nous avait amené à penser que la vitesse d'infiltration n'est pas conditionnée par le gradient d'humidité au front.

B. Conséquences pour les valeurs spécifiques

Les variations différentes de $V = f(I)$ suivant l'état structural ont comme résultat des valeurs spécifiques variables.

1° L'humidité minima à l'infiltration

Elle est plus faible avec le sol agrégé (27-28 p. 100 de terre sèche) qu'avec le sol fin (31-32 p. 100).

La conséquence pratique est que pour une faible intensité d'arrosage, la distribution de l'eau dans le sol varie avec l'état structural. Une même dose conduit donc à une humectation plus profonde dans le sol agrégé. Cet effet est encore accentué par une densité apparente plus faible.

2° La capacité limite d'absorption

Elle est considérablement modifiée par l'état structural. I_{max} est de l'ordre de 120 mm/h pour le sol fin et 1 500 mm/h pour le sol agrégé. Cet ordre de grandeur a d'ailleurs rendu impossible un contrôle expérimental.

En d'autres termes, le sol agrégé accepte, sans refus d'absorption, des intensités considérablement plus élevées que le même sol tamisé à 2 mm. On retrouve là l'effet bénéfique bien connu de l'état structural sur l'absorption et l'infiltration de l'eau [1]. Par le travail convenable du sol, on peut donc augmenter la capacité limite d'absorption, dans des proportions peut-être moins fortes, mais suffisantes pour limiter ou supprimer les risques de ruissellement et d'érosion.

[1] Voir par exemple FÉODOROFF (1961).

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Cette étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante dans le sol initialement sec a été conduite dans le but de préciser la nature des phénomènes et d'en tirer les conséquences pratiques pour l'irrigation et d'une façon générale les aménagements hydrauliques des terrains. Rappelons que les essais ont été effectués en laboratoire sur des modèles simples, en faisant intervenir trois facteurs : la nature du sol, son état structural, l'intensité de l'arrosage.

Pour une intensité constante, l'expérience a mis en évidence les phénomènes suivants :

a) peu de temps après le début de l'arrosage, le front visible d'humectation avance à vitesse constante ;

b) la distribution de l'eau dans la colonne de terre comporte au-dessus du front une tranche où l'humidité s'accroît de bas en haut ; cette tranche est surmontée par une autre où l'humidité est relativement constante. Cette dernière zone s'allonge au fur et à mesure que l'arrosage se prolonge.

Ces phénomènes peuvent être difficilement interprétés par les lois simples, comme la fomule de Poiseuille. De même une description antérieurement proposée par YOUNGS (1960) ne rend pas compte de toutes les observations. Ceci nous a amené à présenter un nouveau schéma descriptif, qui implique l'existence simultanée d'une progression de l'eau *per descensum* dans des pores de dimensions moyennes, et d'un mouvement *latéral* vers les pores les plus fins.

L'expérience a également montré que si les intensités d'arrosage croissent d'une expérience à l'autre, les vitesses d'avancement du front augmentent corrélativement. D'autre part, la quantité d'eau présente à chaque profondeur du sol est accrue. Nous avons attribué ces phénomènes à la pénétration de l'eau dans des pores d'autant plus gros que l'arrosage est plus intense.

La vitesse du front V a été reliée empiriquement à l'intensité I par une relation de la forme

$$V = V_l \, (1 - e^{-\mu I})$$

où V_l (vitesse limite) et μ sont des paramètres dépendant de la nature du sol.

Cette relation permet d'apprécier une intensité maxima admissible, ou capacité limite d'absorption.

Lorsque l'arrosage ne dépasse pas une certaine intensité critique, on peut confondre la courbe et sa tangente à l'origine. Il apparaît alors que la vitesse du front est proportionnelle à l'intensité, et que la teneur en eau du sol ne varie guère avec l'arrosage. Cette observation a permis de définir un concept nouveau : l'humidité

minima à l'infiltration. La valeur de cette dernière se situe au-dessus de la capacité au champ, ce qui laisse prévoir une redistribution notable de l'eau après l'arrosage.

Les essais ont enfin montré l'influence de la nature du sol et de son état structural sur certains des phénomènes étudiés. L'humidité minima est d'autant plus grande que la teneur en argile est plus élevée. Un état structural en agrégats individualisés conduit à une vitesse du front plus grande, une humidité minima plus faible, et une intensité maxima admissible considérablement accrue.

On peut dégager de cette étude plusieurs conséquences pratiques. L'arrosage par aspersion devrait être conduit de façon à ce que l'humidité minima d'infiltration ne soit pas dépassée. Cette valeur et l'intensité critique peuvent être déterminées par des essais préalables en laboratoire. On peut favoriser l'infiltration en maintenant le sol dans un état motteux. De cette façon on réduira en outre les risques de saturation en surface et de ruissellement en cas de forte averse.

ANNEXE I

Calcul du paramètre μ

On prend deux points expérimentaux définis par les coordonnées V_4I_4 et V_5I_5 par exemple. Ceci donne deux équations à deux inconnues : μ et V_l

$$V_4 = V_l\,(1 - e^{-\mu I4}) \qquad (1)$$

$$V_5 = V_l\,(1 - e^{-\mu I5}) \qquad (2)$$

En posant $e^{-\mu} = X$ et en faisant le rapport membre à membre des équations(1) et (2), il vient

$$\frac{V_4}{V_5} = \frac{1 - X^{I_4}}{1 - X^{I_5}}$$

d'où

$$V_4X^{I_5} + V_5 - V_4 = V_5X^{I_4} \qquad (3)$$

Ensuite on pose :

$$Y_a = V_4X^{I_5} + V_5 - V_4$$

$$Y_b = V_5X^{I_4}$$

et on calcule la différence $Y_a - Y_b$ pour différentes valeurs de X. On prend comme solution celle pour laquelle la différence $Y_a - Y_b$ s'annule. Remarquons que ce système admet toujours une première solution pour $X = 1$ donc $\mu = 0$; nous avons bien entendu cherché la deuxième.

Le calcul de X^I se fait au moyen d'une table de logarithmes. Comme $X < 1$, il est commode de passer par l'intermédiaire de $X' = 1/X$.

La différence $Y_a - Y_b$ est considérée comme nulle lorsque la troisième ou la quatrième décimale sont nulles.

On s'arrange pour que cette solution corresponde à une valeur finie de μ (à deux décimales).

μ étant connu de cette façon, on le porte dans les équations (1) et (2), ce qui permet de calculer deux valeurs de V_l.

ANNEXE II

Établissement des courbes de redistribution

A l'issue d'un arrosage l'eau se redistribue, c'est-à-dire que le front continue à progresser tandis que l'humidité à chaque niveau préalablement humide décroît. Une reproduction plus rapide de ce phénomène est obtenue en saturant par remontée

capillaire une *petite* colonne de terre, de faible hauteur, et en l'appliquant ensuite sur une masse *plus importante* de la même terre sèche.

L'eau initialement contenue dans la colonne passe dans le substrat sec. Au bout d'un certain temps on mesure l'humidité résiduelle. Cette opération est répétée autant de fois que cela est nécessaire, avec des mesures échelonnées dans le temps. On obtient ainsi une série de valeurs décroissantes d'humidité (h) correspondant aux différents temps croissants. Pour chaque intervalle expérimental on calcule la valeur absolue de $\Delta h / \Delta t$, ainsi que l'humidité moyenne $\bar{h}$ (en p. 100 de terre sèche). Ces données sont portées sur un graphique, avec $\Delta h / \Delta t$ en ordonnée et $\bar{h}$ en abscisse.

SUMMARY

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFILTRATION OF NON SATURATING WATER. CASE OF AN INITIALLY DRY SOIL AND OF AN IRRIGATION WITHOUT PONDING

An experimental study on the infiltration of non saturating water into an initially dry soil was undertaken with the purpose of specifying the nature of the phenomena and of drawing practical results for the irrigation and, generally speaking, the hydraulic management of the lands. The experiments were done in laboratory on simple models involving three factors : the nature of the soil, its structure, the intensity of rain.

For a constant rain intensity the experience allowed to put into evidence the following facts :

a) A short time after the beginning of the rain-fall, the wetting front progresses at a constant rate.

b) The distribution of the water in the soil column includes, above the front, a zone in which the moisture content increases from down upwards. Above this layer, there is another one in which the moisture content is relatively constant. This last zone grows progressively as the irrigation goes on.

These phenomena can hardly be interpreted by the simple laws of capillarity. In the same way, another explanation, which has formerly been proposed, does not give an account of the totality of the observed facts. This has led to present a new descriptive scheme which supposes the simultaneous existence of a downward progression of the water into pores of middle size and of a lateral progression towards the finer pores.

The experience also showed that, if the irrigation intensity increases from one experience to another, the velocity of the front also increases, but less than proportionally. Consequently, the water content at any depth of the soil is increased. These phenomena can be imputed to the penetration of the water into pores of increased size as the irrigation increases in intensity.

The velocity of the front V was empirically related to the intensity I by means of an equation of the type :

$$V = V_l (1 - e^{-\mu I})$$

in which V_l (limit velocity) and μ are parameters depending on the nature of the soil.

This equation allows to estimate a maximum admissible intensity, or maximum infiltration capacity.

In the scale of low values of I, when the rain does not overstep a certain critical intensity, the curve and its tangent at their origin can be confused. It appears then that the front velocity is proportional to the intensity and that the water content in the soil does not depend on the rain characteristics.

This observation has led us to define a new concept : the « minimum water content at infiltration ». This value is situated above the field capacity ; this fact allows to expect a notable redistribution of the water after the irrigation.

The experiments also revealed the influence of the nature of the soil and of its structural state on some of the phenomena studied :

— the higher the clay content, the more important the « minimum water content ».

— a structure, characterized by the presence of distinct aggregates, leeds to a higher front velocity, a lower minimum water content and a considerably increased maximum admissible intensity.

Several practical results can be drawn out of this study. A sprinkling irrigation should be carried out so as not to exceed the minimum water content at infiltration. This value and the critical intensity can be determined by means of preliminary experiments. The infiltration can be improved by keeping the soil in an aggregated state. Besides, in this way the risks of surface saturation and of a surface run-off in case of heavy rain-falls are reduced.

ZUSAMMENFASSUNG

EXPERIMENTALSTUDIUM DER EINFILTRIERUNG NICHT SATURIERENDEN WASSERS. FALL EINES URSPRÜNGLICH TROCKENEN BODENS UND EINER BEREGNUNG OHNE WASSERSPIEGELBILDUNG AN DER OBERFLÄCHE

In einem ursprünglich trockenen Boden wurde ein Experimentalstudium über Einfiltrierung nicht saturierenden Wassers ausgeführt, mit dem Ziele, die Art der Erscheinungen genauer zu bestimmen, daraus praktische Folgerungen für die Bewässerung und im allgemeinen für die hydraulischen Anlagen zu gewinnen. Die Versuche wurden im Labor auf einfachen Modellen ausgeführt die drei Faktoren ansprechen : Art des Bodens, sein Strukturzustand, die Intensität der Beregnung.

Für eine konstante Intensität konnte das Experiment folgende Erscheinungen herausstellen :

a) kurze Zeit nach Beginn der Beregnung schreitet die Benetzungsfront mit konstanter Geschwindigkeit voran ;

b) die Verteilung des Wassers in einer Bodenkolonne beträgt über der Front einen Abschnitt in welchem die Feuchtigkeit von unten nach oben zunimmt ; über diesem Abschnitt liegt ein anderer mit relativ konstanter Feuchtigkeit. Diese letztere Zone verlängert sich mit der Dauer der Beregnung.

Diese Erscheinungen lassen sich nur schwer mittels der einfachen Kapillargesetze erklären. Eine andere, früher vorgeschlagene Beschreibung gibt keinen Aufschluss über die Gesamtheit der beobachteten Tatsachen. Dies führte dahin, eine neues beschreibendes Schema vorzuschlagen, das das Bestehen eines Voranschreitens des Wassers in Poren mittlerer Grösse mit gleichzeitiger seitlicher Bewegung in Richtung der feinsten Poren einschliesst.

Der Versuch stellte ebenfalls fest, dass wenn die Intensität der Beregnung von einem Versuch zum andern ansteigt, die Geschwindigkeit des Voranschreitens der Front zunimmt, jedoch weniger als proportional. Die Wassermenge, die sich in jeder Bodentiefe befindet, nimmt im gleichen Verhältnis zu. Diese Erscheinungen kann man dem Eindringen des Wassers zuschreiben, in Poren die um so grösser sind, als die Beregnung intensiver ist.

Die Geschwindigkeit der Front V wurde empirisch an die Intensität I gebunden, und zwar durch die Gleichung $V = V_l\ (1 - e^{-\mu I})$ in der V_l (Grenzgeschwindigkeit) und μ von der Bodenart abhängende Parameter sind.

Mit dieser Gleichung vermag man die annehmbare maximale Intensität oder Grenzabsorptionsfähigkeit abschätzen.

Im Bereich der niedrigen Werte, wenn die Beregnung nicht eine gewisse kritische Intensität überschreitet, kann man anfänglich Kurve und ihre Tangente verwechseln. Dann stellt man fest, dass die Geschwindigkeit der Front proportional zur Intensität ist, und dass der Wassergehalt des Bodens sich nur wenig mit der Beregnung ändert. Diese Beobachtung führt dazu, ein neues Konzept zu bestimmen : die minimale Feuchtigkeit bei der Infiltierung ; diese liegt über der Feldkapazität, was eine wichtige Wiederverteilung des Wassers nach der Beregnung voraussehen lässt.

Die Versuche zeigten endlich den Einfluss der Bodenart und seines Strukturzustandes auf die untersuchten Erscheinungen. Die minimale Feuchtigkeit ist um so grösser, als der Gehalt an Ton grösser ist. Ein durch sehr bestimmte Aggregate charakterisierter Strukturzustand führt zu einer grösseren Frontgeschwindigkeit, einer geringeren minimalen Feuchtigkeit und einer stark erhöhten maximalen annehmbaren Intensität.

Diesem Studium kann man mehrere praktische Folgerungen entnehmen. Die Beregnung sollte so vollführt werden, dass die minimale Feuchtigkeit der Infiltrierung nicht überschritten wird. Dieser Wert und die kritische Intensität können durch Vorversuche im Labor bestimmt werden. Die Infiltrierung wird begünstigt, wenn man den Boden im Krümelzustande erhält. Auf diese Art verringert man ausserdem die Saturationsrisiken an der Oberfläche und diejenigen eines Abfliessens im Falle starker Regenfälle.

РЕЗЮМЕ

Экспериментальное исследование инфильтрации ненасыщающей влаги.

Исходно-сухая почва и полив без стояния воды на поверхности.

А. ФЕДОРОВ — Лаборатория почв — Версаль.

Экспериментальное исследование инфильтрации ненасыщающей влаги в исходно-сухой почве было проведено для уточнения природы явлений, выведения практических последствий для ирригаций и вообще мероприятий связанных с водным режимом почвы. Опыты были поставлены в лаборатории с помощью простых моделей, при участии трех факторов : природа почвы, ее структура и интенсивность полива.

При постоянной интенсивности опыты наглядно доказали следующие явления :

а. Спустя некоторое время после начала полива фронт смачивания продвигается с постоянной скоростью.

б. Содержание влаги в колонке почвы над фронтом увеличивается снизу вверх; выше этого участка находится другой, в котором влажность относительно постоянна. Последняя зона удлиняется по мере продолжения полива.

Явления эти трудно об'яснить только простыми законами капилярности. Другое об'яснение, предложенное раньше, также не может дать полного отчета о всех наблюдаемых явлениях. Это привело к созданию новой изобразительной схемы, включающей совместно продвижение влаги книзу в порах средней величины, и побочное движение но направлению к порам наименьшего размера.

Кроме того, ряд опытов показал, что, с увеличением интенсивности полива, скорость продвижения фронта возрастает, но не пропорционально.

Вместе с тем, количество влаги на каждой глубине, тоже возрастает.

Явления эти могут быть приписаны проникновению влаги в поры тем более крупных размеров, чем интенсивнее полив.

Скорость фронта V эмпирически связана с интенсивностью I формулой :

$$V = Vl\,(1 - e^{-\mu I}$$

где Vl (предельная скорость) и μ являются параметрами, зависящими от природы почвы.

При помощи этой формулы можно вычислить максимально допустимую интенсивность, или предельную емкость поглощения.

В диапазоне слабых значений I, пока интенсивность полива не превышает определенного критического уровня, экспериментальные точки практически сливаются с тангенсом в начале. В этом случае скорость продвижения фронта пропорциональна интенсивности полива и содержание влаги на любой, уже смоченой, глубине не меняется с поливом. Это наблюдение позволило вывести новый концепт «минимальной влажности при инфильтрации». Влажность эта превышает полевую влагоемкость, что и разрешает предвидеть заметное перераспределение влаги после полива.

Опыты показали также влияние природы почвы и ее структуры на некоторые из изученных явлений. Минимальная влажность тем выше, чем больше почва содержит глины. Структура отличающаяся крупными агрегатами, характеризуется большей скоростью фронта, более слабой минимальной влажностью, и сильно увеличенной максимально допускаемой интенсивностью полива.

Из данной работы можно вывести несколько практических последствий. Полив дождеванием нужно проводить таким образом, чтобы не превысить минимальной влажности при инфильтрации. Это значение и критическая интенсивность полива могут быть определены предварительными опытами в лаборатории. Можно также способствовать инфильтрации поддерживая комковатость почвы. Таким образом будет уменьшен риск поверхностного насыщения и стока в случае сильных ливней.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAMOVA M. M., BOLCHAKOV A. F., ORECHKINA N. S., RODE A. A., 1956. Évaporation à partir du sol de l'eau suspendue. *Pochvovedenie*, **2**, 27-41. .,

BODMAN G. B., COLMAN E. A., 1943. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **8**, 116-122.

BOUASSE H., 1924. *Capillarité. Phénomènes superficiels*. 1 Vol., 437 p. Delagrave, éd. Paris.

BOUCHARDEAU A., RODIER J., 1960. Nouvelle méthode de détermination de la capacité d'absorption en terrains perméables. *Mém. et Trav. de la S. H. F.*, **1**, 87-93.

DEMOLON A., BASTISSE E., 1934. Sur la dispersion des colloïdes argileux. Application à leur extraction *C. R. Ire Com. de l'A. I. S. S.*, Versailles, 47.

DOLGOV S. I., 1948. *Recherches sur les mouvements de l'eau du sol et son accessibilité aux plantes*. Ed. Acad. Sci. U.R.S.S, Moscou, Leningrad, 206 p.

DUIN R. H. A. van, 1955. Tillage in relation to rainfall intensity and infiltration capacity of soils. *Netherl. J. agric. Sci.*, **3**, 182-191.

EMERSON W. W., GRUNDY G. M. F., 1954-55. The effect of rate of wetting on water uptake and cohesion of soil crumbs. *J. agric. Sci.*, **44**, pp. 249-53.

ENGELHARDT J. H., 1928-29. Some contributions to the knowledge of capillary phenomena in connection with the heterogeneity of the soil. *Soil Research.*, 239-301.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale des sols. Nouvelles formes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.* **6**, pp. 651-59.

FEODOROFF A., 1961. Influence des propriétés structurales sur la pénétration de l'eau dans un sol sec. *C. R. Acad. Agric.*, **47**, 164-5.

FEODOROFF A., 1962. Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. *Ann. agron.* **13**, 523-547.

FEODOROFF A., RAFI M., 1962. Évaporation de l'eau à partir d'un sol nu. Les trois stades de l'évaporation. *C. R. Acad. Sci.*, **255**, 5468-70.

FEODOROFF A., BÉTRÉMIEUX R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la mesure de la capacité au champ. *Science du Sol*, 2e sem., pp. 111-118.

FEODOROFF A., 1964. Remarques sur le mécanisme de l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol initialement sec. *C. R. Acad. Sci.*, **259**, 4320-4322.

GREEN R. E., 1963. Infiltration of water into soils as influenced by antecedent moisture. *Diss. Abs.*, **23** 2270-1.

HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. Thèse. *Ann. agron.*, **2**, p. 143-244.

HANKS R. J., BOWERS S. A., 1963. Influence of variations in the diffusivity-water content relations on infiltration. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **27**, 3, 263-73.

HÉNIN S., MONNIER G., COMBEAU A., 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.* **1**, 73-92.

KEEN B. A., 1931. *The physical properties of the soil*. 380 p. Ed. Longmans, Green and Co.

KING F. H., 1898. Principles and conditions of the movements of ground water. *19th annual report. U. S. Geol. Survey*, **2**, 59-294.

MCINNES D. A., DOLE M., 1928. Differential potentiometric titration: 3. An improved apparatus and its application to precision measurements. *J. Amer. Chem. Soc.* **51**, 1119-27.

MARSHALL T. J., STIRK G. B., 1949. Pressure potential of water moving downward into soil. *Soil Sci.* **68**, 359-370.

MOREL R., FEODOROFF A., 1961. *L'érosion des sols et l'agriculture centrafricaine*. Film. Serv. du Film de l'O. N. Universités, Paris.

PELISHEK R. E., OSBORN J., LETEY J., 1962. The effect of wetting agents on infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **26**, 595-599.

PHILIP A., 1957 *a*). The theory of infiltration. 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Sci.* **83,** 345-357

PHILIP A., 1957 *b*). The theory of infiltration. 2. Tne profile at infinity. *Soil Sci.* **83,** 435-48.

QUIRK J. P. ,PANABOKKE G. R., 1962. Pore volume size distribution and swelling of natural soil aggregates. *J. Soil Sci.* **13,** 71-81.

RÉMÉNIÉRAS G., 1960. *L'hydrologie de l'ingénieur,* Eyrolles, Paris. 413 p.

RIOU Ch., 1963. Quelques relations entre pluie, ruissellement et infiltration obtenues en laboratoire sur des sols initialement secs. *C. R. A. I. H. S. Berkley.*

RODE A. A., 1960. *Méthodes d'étude du régime hydrique des sols.* Éd. Acad. Sci. U.R.S.S. Moscou. 242 p.

RUBIN J., STEINHARDT R., 1963. Soil water relations during rain infiltration. 1. Theory. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **27,** 246-51.

RUBIN J., STEINHARDT R., REINIGER P., 1964. Soil water relations during rain infiltration. 2. Moisture content profiles during rains of low intensities. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **28,** 1-5.

TAMBOLI P. M., 1961. The influence of bulk density and aggregates size on soil moisture retention. *Diss. Abst.* 952.

TSCHAPEK M., 1961. El desalojo del agua en el suelo. *Rev. investig. agric.,* XV, 465-72.

VESSEREAU A., 1960. *Méthodes statistiques en biologie et agronomie,* Baillère, éd. Paris.

VLADYCHENSKY S. A., 1962. Remontée capillaire de l'eau dans des sables de différentes dimensions. *Pochvovedenie,* **10,** 62-66.

YOUNGS E. G., 1960. The hysteresis effect in soil moisture studies. *C. R. 7e Congrès de l'A.I.S.S.* (Madison). **1,**14, pp. 107-113.

Ann. agron., 1965, **16** (3), 265-286.

DISCUSSION SUR LES FACTEURS FAVORABLES A UNE CONTAMINATION RADIOACTIVE DES VÉGÉTAUX CULTIVÉS

R. BITTEL

Centre d'Études nucléaires, Fontenay-aux-Roses,
Département de la Protection sanitaire

SOMMAIRE

Les végétaux peuvent être des vecteurs alimentaires importants de la contamination radioactive. On s'est donc efforcé de définir les différents facteurs susceptibles de favoriser leur radiopollution dans le but d'évaluer les risques dus aux retombées et aux rejets des effluents radioactifs dans la biosphère, en particulier dans les cours d'eau, et de délimiter des zones critiques où le contrôle devra être particulièrement vigilant. Les éventualités de contamination des végétaux, d'une part, par voie indirecte à partir du sol et, d'autre part, par absorption directe au niveau des organes aériens ont été successivement envisagées. L'inventaire des conditions favorables à une contamination radioactive, qui a pu être dressé, souligne, s'il en est besoin, l'importance pratique et actuelle du problème posé.

I. INTRODUCTION

Dans la biosphère, dans laquelle les végétaux puisent leurs aliments, se trouvent de nombreux radioéléments :

— des radioéléments naturels : radioéléments des familles radioactives ; radioéléments naturels isolés tels ^{40}K ; radioéléments induits par le rayonnement cosmique;

— des radioéléments artificiels dont la présence résulte des retombées à la suite d'explosions nucléaires et du fonctionnement des centres et usines atomiques (fonctionnement normal et accidents).

La question du devenir des radioéléments des retombées a posé de graves problèmes et, en raison de la longue période de certains radioéléments, elle continuera à en poser. On peut cependant espérer que cet aspect tendra à perdre progressivement de son acuité. Par contre, parmi les multiples causes de radiocontamination du milieu, il en est une qui est intimement liée à l'activité scientifique et industrielle

de l'homme et qui, par suite, devrait prendre une importance croissante : c'est celle qui résulte du rejet dans le milieu des effluents gazeux et liquides. Comme dans bien d'autres domaines industriels, le sort à réserver aux déchets pose de graves problèmes à ceux qui ont le souci de concilier les impératifs du développement industriel et technique et de la protection de la biosphère. En France, les effluents liquides et gazeux sont d'abord partiellement décontaminés, puis ils sont rejetés soit dans les cours d'eau, soit dans l'air. Ces rejets sont soumis à des règles établies en fonction de normes de protection basées sur l'hypothèse suivant laquelle les seuls vecteurs de la radiocontamination de l'homme sont soit l'eau de boisson ingérée, soit l'air inhalé Mais si l'eau des cours d'eau qui servent d'émonctoires aux effluents des installations nucléaires est une source d'eau potable pour l'homme et les animaux, elle a aussi de multiples autres usages agricoles et industriels. Ainsi, de grandes quantités d'eau sont prélevées aux rivières en aval des points de rejets pour être apportées aux sols et aux végétaux lors des pratiques d'irrigation. D'autre part, certaines industries agricoles emploient de grands volumes d'air pour effectuer des opérations de séchage à froid. On conçoit donc aisément que les divers aliments de l'homme puissent être radiocontaminés et que les normes de protection existantes paraissent actuellement insuffisantes : c'est par la chaîne alimentaire dans son ensemble, et non seulement par l'eau et par l'air, que les animaux supérieurs peuvent subir une contamination radioactive. Parmi les aliments, il semble bien que ce soient les végétaux cultivés qui, compte tenu du régime alimentaire moyen des Français, sont les vecteurs alimentaires les plus importants.

Il est courant d'affirmer que la composition élémentaire des végétaux est plastique : elle dépend dans une certaine mesure de la quantité d'éléments dans le milieu disponibles sous une forme assimilable. Or, les plantes font mal la discrimination entre les isotopes stables et les isotopes instables d'un même élément. La notion de plasticité est donc valable pour les radioéléments ; autrement dit, les végétaux prélèvent dans le milieu des quantités variables d'un radioélément en fonction de divers facteurs. Il existe dans le milieu des conditions défavorables ou bien des conditions favorables à leur contamination.

L'intérêt pratique qu'il y a à définir le mieux possible les facteurs du milieu favorables à une contamination radioactive des végétaux est évident, puisque ces végétaux constituent une partie importante du régime alimentaire. Ces facteurs peuvent donc être considérés comme des facteurs critiques pour la contamination de l'homme. Un tel travail peut servir de base à des essais en vue de localiser les zones ou régions du territoire agricole où un certain nombre de ces facteurs est réalisé et où le contrôle en matière de radioactivité devra être plus sévère. On pourra alors apprécier la capacité d'acceptation d'un bassin fluvial pour les effluents radioactifs liquides, notion qui risque d'être un facteur limitant pour le développement de l'énergie nucléaire.

Le problème, très vaste, sera volontairement limité aux facteurs intervenant pendant la culture proprement dite et aux cas où la radioactivité est apportée en même temps que l'eau : c'est celui des retombées liquides et celui de la radiocontamination par suite des pratiques de l'irrigation par des eaux polluées. Les seuls radioéléments envisagés sont ceux qui ont une période physique grande ou moyenne et qui sont susceptibles de franchir la barrière intestinale de l'homme ; c'est-à-dire : ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{55}Fe, ^{59}Fe, ^{65}Zn et ^{54}Mn, ces quatre derniers isotopes étant des produits

d'activation de périodes moyennes assez fréquents dans les rejets et dont l'intérêt biochimique est réel.

On sait que les végétaux peuvent prélever leurs aliments, à partir du sol, par suite d'une absorption racinaire et, à partir de l'atmosphère, par suite d'une absorption au niveau de leurs organes aériens. On conçoit donc qu'ils puissent se contaminer indirectement en empruntant des radioéléments au sol (c'est la contamination indirecte ou contamination par voie racinaire) ou bien, directement en absorbant les radioéléments qui parviennent sur les feuilles, les fleurs, les fruits ou bien séjournent à la base des parties aériennes (contamination directe).

II. — CONDITIONS FAVORABLES A LA CONTAMINATION INDIRECTE

On distinguera les conditions propres au sol, les conditions propres à la plante et celles relatives aux techniques culturales.

Conditions du sol

Position du problème

Si on admet différentes hypothèses, on peut prévoir les limites d'accumulation des radioéléments de longue période dans le sol et dans les récoltes (Barbier, Mme Huguet, Michon, Mlle Tyszkiewicz, 1958). Supposons que la radioactivité r soit apportée au sol avec une intensité constante a en même temps que l'eau par les pluies (retombées) ou par les irrigations. Admettons que les seules causes de déperdition de la radioactivité soient la décroissance physique, l'infiltration dans le sous-sol et le prélèvement par les plantes.

Soient λ le coefficient de décroissance radioactive de r.

Admettons que des fractions γ_1 et γ_2 de r soient perdues par unité de temps, respectivement à la suite d'infiltration dans le sous-sol et de prélèvement par les plantes.

Le bilan de radioactivité entre le temps t et $t + dt$ donne :

$$dr = adt - \lambda r dt - (\gamma_1 + \gamma_2) r dt.$$

En intégrant entre les instants 0 et t avec les conditions initiales : $r = 0$ pour $t = 0$, il vient :

$$r = \frac{a}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2} \left[1 - e^{-(\lambda + \gamma_1 + \gamma_2)t}\right]$$

Quand t devient grand, r tend vers la limite

$$R = \frac{a}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2} \qquad \text{(relation 1)}$$

La radioactivité du sol ou du moins de la couche du sol intéressée par les racines

ne dépassera pas cette valeur limite R. La valeur $r = \frac{R}{2}$ sera atteinte au bout d'un temps :

$$T = \frac{Lg2}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2} = \frac{0{,}7}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2}.$$

T a en quelque sorte la signification d'une période de « croissance radioactive ». Lorsque la radioactivité du sol aura atteint cette limite R, les végétaux cultivés présenteront une radioactivité R′ et on peut admettre que dans des conditions pédoclimatiques et culturales données R′ est proportionnelle à R, le coefficient c de proportionnalité ayant la signification d'un coefficient d'assimilabilité. Le point de vue de la radioprotection peut alors s'énoncer ainsi : R′ doit être telle que, du fait de l'ingestion normale par l'homme des végétaux cultivés, les limites fixées par les normes pour la contamination de l'organisme ne soient jamais atteintes.

$$R' = \frac{c \cdot a}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2}.$$

Supposons que la radioactivité soit apportée au sol par les retombées liquides et l'eau d'irrigation à raison de b picocuries par litre d'eau, h étant la quantité d'eau apportée à l'unité de surface du sol pendant l'unité de temps (h en l/m²/an ou en mm/an par exemple), on a : $a = bh$

et

$$R' = \frac{cbh}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2}. \qquad \text{(relation 2)}$$

Mais il est clair que γ_2 qui mesure l'intensité du prélèvement racinaire et c ne sont pas indépendants ; on peut poser : $\gamma_2 = k_2 c$; alors :

$$\boxed{R' = \frac{cbh}{\lambda + \gamma_1 + k_2 c}}. \qquad \text{(relation 3)}$$

La relation 3 montre que R′ dépend de deux groupes de facteurs :

— des facteurs dépendant des rejets et du sort des radioéléments dans l'eau, avant l'apport au sol : coefficients b et λ ;

— des facteurs agronomiques :

c : coefficient d'assimilabilité;
γ_1 : coefficient d'entraînement par drainage ;
h : hauteur d'eau à apporter au sol ou reçue par lui

Dans cette étude. seuls les coefficients « agronomiques » seront pris en considération. Cependant, la dépendance de R′ vis-à-vis de λ montre que le problème de la contamination des végétaux à la limite d'accumulation de la radioactivité dans le sol ne se pose que pour certains radioéléments : ce sont les radioéléments dont la vie est la plus longue et qui sont absorbés au niveau de la paroi intestinale de l'homme, c'est-à-dire : le strontium-90 (^{90}Sr) et peut-être le strontium-89, le césium-137 (^{137}Cs) parmi les produits de fission, et parmi les produits d'activation neutronique les radioisotopes du fer : ^{55}Fe et ^{59}Fe, le radioisotope du manganèse: ^{54}Mn, le radioisotope du zinc: ^{65}Zn.

Les caractéristiques radioactives de ces éléments sont respectivement les suivantes :

^{90}Sr Période 28 ans ; $\lambda = 0{,}025\ an^{-1}$
^{89}Sr Période 51 jours ; $\lambda = 5\ an^{-1}$
^{137}Cs Période 30 ans ; $\lambda = 0{,}023\ an^{-1}$
^{55}Fe Période 2,7 ans ; $\lambda = 0{,}26\ an^{-1}$
^{59}Fe Période 45 jours ; $\lambda = 6\ an^{-1}$
^{54}Mn Période 291 jours ; $\lambda = 0{,}8\ an^{-1}$
^{65}Zn Période 245 jours ; $\lambda = 1\ an^{-1}$

Les « périodes de croissance » dans le sol :

$$T = \frac{0{,}7}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2}$$

sont de l'ordre de vingt ans pour ^{90}Sr, de l'ordre de vingt-cinq ans pour ^{137}Cs et de l'ordre de l'année pour les autres isotopes cités précédemment. On conçoit donc que ce sont surtout ^{90}Sr et ^{137}Cs qui retiennent l'attention.

Étude du facteur assimilabilité : coefficient c

Comme on pouvait le prévoir, R′ est une fonction croissante du coefficient d'assimilabilité *c*. La présence explicite d'un tel facteur dans l'expression mathématique de R′ indique déjà combien les problèmes relatifs à la contamination indirecte des végétaux sont, dans leur esprit, voisins des problèmes plus généraux de nutrition minérale des végétaux et de fertilisation. D'ailleurs, les radioéléments parvenant au sol représentent une masse infime par rapport à celle des isotopes stables, même si, comme c'est le cas, ceux-ci sont des oligoéléments. Il est donc logique de penser qu'ils subissent, sans les modifier, les équilibres hétérogènes entre les phases solide et liquide du sol. Les résultats des expérimentations concernant certains radioéléments dans le sol, en particulier ^{89}Sr et ^{90}Sr, peuvent s'interpréter sur la base des notions fondamentales de science du sol et de nutrition minérale des végétaux ; les mêmes lois paraissent régir l'absorption des éléments à partir du sol qu'il s'agisse d'éléments stables ou d'éléments instables : l'absorption des ions du sol par les racines résulte d'un échange entre les ions sécrétés par la plante, en particulier les ions H^+, et les ions présents dans le sol à l'état autodiffusible (Bittel, 1956 ; Truog, 1961 ; Sutcliffe, 1962).

Le strontium-90 a, dans le sol, un comportement assez voisin de celui du calcium ; il est soumis à des équilibres d'échange ionique, ne rétrograde pas dans les argiles (Grim, 1953 ; Marshall, 1949) et par suite reste accessible aux végétaux tant qu'il n'est pas séquestré dans des minéraux nouvellement précipités (calcaire). Son assimilabilité est, toute chose égale, d'autant plus intense que la capacité d'échange du sol (C. E. C.) est plus faible (Haghiri, Sayre, 1961 ; I. N. R. A.-C. E.A., 1961, 1963 et 1964).

Les ions Sr^{++} échangeables sont en quelque sorte dilués par les ions Ca^{++} qui concurrencent l'absorption des premiers : le rapport $\frac{Sr}{Ca}$ dans la plante est peu diffé-

rent de la valeur $\frac{\text{Sr échangeable}}{\text{Ca échangeable}}$ (HAGHIRI, SAYRE, 1961 ; MARTIN, NEWBOULD et RUSSELL, 1958).

C'est sur des sols légers, plus ou moins décalcifiés, que les risques de contamination des végétaux en ^{90}Sr (par voie indirecte) *sont les plus grands.* Les risques sont, pour une même quantité de radioélément restée dans le sol, moins importants pour les végétaux cultivés sur sols argileux ou humifères, surtout en présence de calcaire maintenant les échangeurs saturés de calcium.

Le *césium* est fortement adsorbé par les argiles dans la structure desquelles il peut souvent pénétrer (argile du type Si-Al-Si). L'expérience montre qu'il suffit d'une faible proportion de colloïdes argileux dans le sol pour empêcher son infiltration en profondeur. Mais si le sol est pauvre en argile, une fraction importante du césium-137 peut rester absorbable par les racines. C'est donc dans les sols à faible capacité d'échange que les risques de contamination en ^{137}Cs sont les plus grands.

En ce qui concerne les radioéléments produits à la suite d'une activation neutronique, les remarques suivantes peuvent être faites : le zinc-65 est un radioélément qui se fixe énergiquement dans les argiles et sur les chélateurs ; il peut pénétrer dans la structure cristalline des argiles feuilletées du type Si-Al-Si (MARSHALL, 1949, BITTEL, 1956). D'autre part, dans les sols calcaires. le zinc est fortement insolubilisé. Le radioélément ^{65}Zn est donc surtout mobile dans les sols non calcaires à faible capacité d'échange et c'est pour les végétaux cultivés sur de tels sols que les risques de radiocontamination en ^{65}Zn paraissent les plus grands.

Les radioisotopes du fer et du manganèse présentent dans le sol des comportements voisins. Ils sont fortement adsorbés par les colloïdes et Fe^{+++} rétrograde dans les feuillets des argiles du type Si-Al-Si (GRIM, 1953 ; MARSHALL, 1949). Ils sont d'autre part soumis dans le sol à des équilibres d'oxydoréduction et seules les formes réduites ou facilement réductibles sont utilisables par les végétaux. Les sols qui cèdent le plus aisément les radioisotopes du fer et du manganèse sont donc les sols peu argileux, acides et réducteurs (BITTEL, 1957).

En résumé, l'analyse précédente montre que les conditions du sol favorisant l'assimilabilité racinaire des radioéléments sont :

— *une capacité d'échange de cations (CEC) faible :* sols sableux, peu argileux, peu humifères ;

— *un pH relativement faible (Sr)* : sols légèrement et franchement acides et, pour les isotopes du fer et du manganèse, *un milieu réducteur* souvent rencontré dans les sols irrigués par submersion (rizières en particulier).

Étude du facteur : pertes par drainage : coefficient γ_1

Les pertes par entraînement en profondeur sont mesurées par le coefficient γ_1.

Dans le cas où le sol ne subit aucune façon aratoire, un certain entraînement en profondeur est indispensable pour que les radioéléments parviennent aux racines absorbantes : c'est le cas des prairies permanentes et de certains vergers dont le sol est laissé à lui-même. La contamination racinaire suppose une valeur assez grande pour γ_1.

Dans un sol où la couche labourée est homogénéisée plus ou moins complète-

ment, les radioéléments qui s'infiltrent dans le sol n'échappent pas totalement aux racines, notamment si l'enracinement est profond.

Une fraction importante des sels dissous est constituée par des bicarbonates et la quantité qui traverse un niveau donné augmente quand la quantité d'eau drainée augmente. La répartition des ions calcium et strontium-90 peut être représentée par la relation suivante :

$$\left[\frac{^{90}\mathrm{Sr}}{\mathrm{Ca}}\right]_{\mathrm{Sol}} = k\left[\frac{^{90}\mathrm{Sr}}{\mathrm{Ca}}\right]_{\mathrm{Solution}}$$

qui peut aussi s'écrire :

$$\frac{^{90}\mathrm{Sr}_{\mathrm{Solution}}}{^{90}\mathrm{Sr}_{\mathrm{Sol}}} = \frac{1}{k}\frac{\mathrm{Ca}_{\mathrm{Solution}}}{\mathrm{Ca}_{\mathrm{Sol}}},$$

la fraction du ^{90}Sr de la couche labourée qui s'infiltre pendant un certain temps est donc proportionnelle à la fraction infiltrée du calcium échangeable (BARBIER, 1963). Pour une teneur donnée en calcium échangeable, l'entraînement en profondeur du ^{90}Sr est d'autant plus intense que la capacité d'échange est faible.

Remarque. — On constate que plus la capacité d'échange du sol augmente et moins l'assimilabilité racinaire mesurée par c est importante et moins les pertes par drainage mesurées par γ_1 sont grandes. Le sens des variations de R′, radiocontamination de la plante lorsque le sol a atteint sa contamination limite R, en fonction de la seule capacité d'échange du sol ne peut donc être prévu *a priori*, puisque dans l'expression de R′, c figure à la fois au numérateur et au dénominateur et que γ_1 figure au dénominateur. Si on admet que c et γ_1 varient simultanément en raison inverse de la capacité d'échange du sol, CEC, en posant :

$$c = \frac{k}{\mathrm{C.E.C.}} \quad \text{et} \quad \gamma_1 = \frac{k_1}{\mathrm{C.E.C.}};$$

on a

$$\mathrm{R}' = \frac{bhk}{k_2 k + k_1 + \lambda \mathrm{C.E.C.}}.$$

R′ est alors une fonction décroissante de la capacité d'échange du sol, ce qui semble bien être confirmé par l'expérience. (I.N.R.A.-C.E.A., 1961, 1963 et 1964).

Étude du facteur : développement racinaire

La distribution des racines dans le profil du sol dépend à la fois des caractéristiques spécifiques des plantes et des caractéristiques du milieu sol. Or, le développement racinaire peut conditionner la contamination de la plante. C'est en particulier le cas des plantes se développant sur des sols non labourés (prairies) ou soumis à des façons très superficielles (vergers). On conçoit aisément que, la contamination étant apportée de l'extérieur, les risques de contamination de la plante soient, toute chose égale par ailleurs, d'autant plus grands que l'enracinement est plus superficiel et intéresse la plus grande surface.

A. *Dépendance vis-à-vis de la distribution de l'eau et des aliments nutritifs dans le sol.*

La répartition de l'eau dans le sol et par suite les modalités de son apport peuvent modifier le système radiculaire ; en général, les racines se développent dans les horizons bien pourvus en eau à moins qu'ils ne soient asphyxiants. Si l'eau est apportée au sol (par la pluie ou par l'irrigation) fréquemment mais par petites quantités, seuls les horizons superficiels seront mouillés et on favorisera ainsi l'enracinement superficiel, et par suite, des conditions favorables à une radiocontamination peuvent être créées. Au contraire, si l'eau est apportée à un rythme plus lent, mais en grande quantité (pluies rares, mais abondantes ; irrigation tous les dix jours, rythme souvent adopté dans les régions méditerranéennes), l'enracinement profond est favorisé et les risques de contamination sont moindres. La pratique du *mulching* qui tend à une économie de l'eau favorise le développement de racines superficielles. On note de nombreuses racines dans les horizons les mieux pourvus en éléments nutritifs (HÉNIN, 1960 ; GLIEMEROTH, 1953 et 1959 ; SOUBIÈS, 1952). Dans le cas de vergers où les façons culturales sont superficielles, l'influence de l'état nutritif des divers horizons du sol peut avoir une grande influence sur la répartition des racines suivant la profondeur : l'incorporation en profondeur à la plantation d'engrais à décomposition très lente peut réduire l'absorption des radioéléments à la surface du sol.

B. *Dépendance vis-à-vis du milieu physique.*

Un obstacle mécanique ou physique peut empêcher la libre extension du système radiculaire. C'est en particulier le cas des sols dans lesquels un horizon compact et imperméable inhibe mécaniquement l'extension radiculaire en profondeur. Dans ce cas, bien souvent la circulation de l'eau est gênée et au-dessus de l'horizon imperméable il se crée des nappes permanentes ou non. Les racines cherchent à éviter les conditions asphyxiantes et restent superficielles. Ces conditions, dites conditions d'hydromorphisme, sont par suite, favorables à une contamination.

CONDITIONS PROPRES A LA PLANTE

Système racinaire

Bien que, comme cela vient être souligné (II-1-4), le système racinaire soit modifié en fonction du milieu sol, on peut cependant distinguer des tendances spécifiques : ainsi les racines du pêcher tendent à rester superficielles (sauf dans le cas d'un verger dense où les systèmes racinaires se gênent) (GROLLEAU, 1964) ; il en est de même de l'abricotier greffé sur pêcher ou prunier *Myrobolan*, du poirier greffé sur cognassier, du pommier greffé sur *Paradis jaune de Metz* (LAUMONNIER, 1960), du fraisier, du melon, de la laitue et de la tomate et de la plupart des légumes (sauf pois et haricots). Les racines de ces plantes prélèvent les éléments du sol dans l'horizon superficiel et sont par suite facilement accessibles à la contamination apportée par l'eau.

Le fonctionnement même des racines peut différer suivant les familles en relation avec la capacité d'échange de cations des racines (ELGABALY et WIKLANDER, 1949 ; BLANC-AICARD, 1955). Il semble bien que les Dicotylédones. et en particulier

les Légumineuses aient une capacité d'échange racinaire supérieure à celle des Monocotylédones et en particulier des Graminées. Ce fait a été mis en relation avec l'absorption prépondérante des cations alcalino-terreux par les légumineuses et avec l'absorption propondérante des alcalins par les céréales. On peut donc prévoir que les légumineuses auront une tendance particulière à prélever plus intensément que d'autres plantes le strontium dans le sol, alors qu'au contraire les céréales prélèveront de préférence le césium si celui-ci est disponible dans le sol (sols sableux). Mais il n'est pas démontré que la discrimination du strontium et du calcium soit différentes chez les Légumineuses et les Graminées.

Métabolisme de la plante

Les radioéléments absorbés au niveau des racines se comportent dans la plante d'une façon voisine de celle des éléments stables les plus proches : par exemple, ^{90}Sr suit approximativement le sort du calcium. Cet aspect sera d'ailleurs discuté dans le cas de la contamination directe (cf. : III-2). ^{90}Sr va se localiser comme Ca principalement dans les feuilles et parfois dans les tiges, il migre très peu vers les fruits et les graines. Tous autres facteurs égaux, c'est donc les légumes dont on consomme les feuilles (choux, épinards, salades) qui risquent le plus d'être contaminés en ^{90}Sr, mais le rapport $\frac{^{90}Sr}{Ca}$ n'y est pas nécessairement plus grand.

Si ^{137}Cs est en général difficilement et peu intensément absorbé au niveau des racines, une fois qu'il a pénétré dans la plante, il y est très mobile et se répartit dans tous les organes, en particulier, les fruits et les tubercules (pomme de terre).

Adaptation de la plante aux divers sols

Les divers produits alimentaires proviennent de plantes cultivées de préférence sur certains types de sols. De ce fait certains peuvent être plus contaminés que d'autres, en ^{90}Sr notamment.

Ainsi, en ce qui concerne la région du Bas-Rhône et de la Provence (Laumonnier, 1960-1962 ; DSA de Vaucluse, 1958, Ravel d'Esclapon et Ballot, 1960) :

— les plantes cultivées sur sols légers : pommes de terre, carottes ;

— les plantes qu'on peut cultiver sur sols caillouteux, acides ou à très faible capacité d'échange : melons, fraisiers, cerisiers ;

— les arbres fruitiers qui craignent la chlorose et qu'on cultive surtout sur sols non calcaires, quelquefois nettement acides : pêchers, abricotiers greffés sur *Myrobolan* ou pêcher franc, cerisiers greffés sur merisier, poiriers greffés sur merisier.

III. — CONDITIONS FAVORABLES A LA CONTAMINATION DIRECTE

Les végétaux peuvent se contaminer directement en absorbant les radioéléments au niveau de chacun de leurs organes aériens : feuilles et tiges, fleurs et fruits, base des plantes. Cette contamination semble faire appel à la succession des mécanismes suivants (Bittel, Clément, 1965) :

— rétention mécanique et adsorption physique sur les organes aériens ;

— adsorption physico-chimique passive, indépendante du métabolisme ;
— adsorption active (métabolique) impliquant la liaison du radioélément à un métabolite et transfert à l'intérieur de la plante. (JYUNG, 1963).

CONDITIONS DÉPENDANT DE L'APPORT DE LA RADIOACTIVITÉ

Répartition sur la plante de l'eau, vecteur de la radioactivité

Pour que l'eau de pluie ou l'eau apportée par l'irrigation par aspersion puisse éventuellement céder aux organes aériens de la plante les radioéléments qui la contaminent il est nécessaire que les gouttes et gouttelettes demeurent un certain temps au contact des tissus végétaux. On a remarqué que les gouttelettes les plus fines, dont le diamètre est au plus égal à 40 μ ont la plus grande probabilité de rester fixées par adsorption physique. Toutes choses égales par ailleurs, ce seront donc les brouillards, les givres, les précipitations pulvérisant finement l'eau (crachins), les gouttelettes les plus petites des précipitations artificielles qui ont la plus grande probabilité de contaminer les organes aériens des végétaux.

Lorsque la radioactivité est apportée par la pluie ou les brouillards (retombées humides), les risques sont d'autant plus grands que ces précipitations interviennent à des époques où la plante est la plus apte à retenir l'eau ou bien à absorber les éléments qui la contaminent, c'est-à-dire qu'ils sont importants dans les régions où les précipitations les plus contaminées par les retombées coïncident avec les périodes actives de végétation : les brouillards, les pluies fines d'automne et d'hiver conduisent parfois à des entraînements importants de la radioactivité atmosphérique et peuvent être la cause d'une contamination importante des prairies permanentes ou des végétaux à feuilles persistantes. Pour les autres végétaux, la contamination directe suppose que l'eau parvienne au végétal au printemps et en été ; alors, les fortes pluies orageuses, qui après des périodes assez longues de sécheresse lavent l'atmosphère, peuvent entraîner vers les organes aériens des végétaux des quantités assez importantes de radioactivité ; mais la fraction de l'eau retenue par la plante est alors petite. Si l'eau est apportée aux végétaux par les pratiques de l'irrigation par aspersion, elle est répartie à un rythme qui dépend des besoins réels de la plante, donc surtout pendant les périodes actives de la végétation, qui sont également celles où les organes aériens peuvent le plus intensément retenir et absorber les éléments dissous dans l'eau qui leur est offerte.

La tenue d'un calendrier où sont indiquées les dates extrêmes des périodes d'aspersion, les périodes normales correspondant à la floraison, à la foliation, à la récolte, aide à une évaluation des risques (tabl. 1).

Nature et origine de l'eau

En principe, les risques d'une irrigation par aspersion existent chaque fois que l'eau est prélevée dans un cours d'eau servant d'émonctoire à des effluents radioactifs en aval des points de rejet. Mais il faut tenir compte de différents phénomènes (RODIER, 1961 ; FRIEND, 1963, KORNEGAY, 1963 ; PARKER, 1963) :

TABLEAU I

Calendrier des périodes d'irrigation par aspersion et de celles correspondant à la foliation, à la floraison et à la récolte pour quelques cultures importantes dans le sud-est de la France
(d'après LAUMONNIER, 1960 ; R. d'ESCARPON et BALLOT, 1960 et les D. S. A. du Vaucluse, 1958).

Cultures	Irrigation	Floraison	Foliation	Récolte
Pêchers (précoces)	1-5 10-9	mi-mars	mi-mars	20-5, août
Abricotiers	mai-juin juillet août	fin février	début mars	15-6, 15-7
Pommiers	1-5 15-9	fin avril	début mai	10-7, 10-10
Poiriers	1-4 1-7	mars	mars	1-7, 1-10
Pommes de terre	1-4 1-7			1-7, 1-99
Melons.....	1-5 10-8			1-7, 1-10
Fraisiers	dès avril			15-4, 1-6
Tomates	dès mai	1er avril		fin juillet, fin octobre

— dilution mécanique dans le cours d'eau ;

— mécanismes physico-chimiques et biologiques d'auto-épuration : sorption des radioéléments sur les bords des rivières et sur les matériaux colloïdaux charriés, absorption par les êtres vivants aquatiques, phénomènes de floculation ;

— mécanismes locaux de mise en solution ou en suspension de radioéléments déjà floculés.

En général, les phénomènes d'auto-épuration suffisent à débarrasser rapidement les eaux d'une grande partie des radioisotopes : ^{137}Cs, ^{59}Fe et ^{55}Fe, ^{65}Zn, ^{54}Mn, mais les ions $^{90}Sr^{++}$ moins fortement fixés par les colloïdes peuvent migrer loin des points de rejet et contaminer les eaux d'irrigation, même si celles-ci sont prélevées dans les cours d'eau très en aval.

Un examen complet de l'hydrologie de l'émonctoire est le plus souvent indispensable pour apprécier les risques résultant de l'utilisation de l'eau prélevée dans celui-ci en aval des points de rejet et cette étude n'est pas abordée dans cette mise au point.

CONDITIONS DÉPENDANT DE LA PLANTE

Nature de la surface des organes aériens et sort de l'eau temporairement retenue

Des conditions favorables à une contamination radioactive directe peuvent être réalisées quand les parties aériennes des végétaux peuvent intercepter puis retenir pendant un certain temps, l'eau apportée par la pluie ou les irrigations. Pour évaluer cette aptitude, il faut tenir compte du fait que les gouttelettes d'eau peuvent parvenir au végétal sous des incidences très variées : on doit donc prendre

en considération les possibilités d'interceptions verticales (pour les pluies lourdes), obliques pour les pluies accompagnées de vent et les aspersions, et horizontales pour les aérosols humides. Certains végétaux doivent retenir particulièrement l'attention parce que la morphologie externe de leurs organes aériens les rend aptes à une bonne interception de l'eau (BITTEL, CLÉMENT, 1965) :

— végétaux dont les feuilles présentent une grande surface, en particulier les salades, les choux, les blettes, les épinards, les pommes de terre, etc.. ;

— végétaux occupant le sol pendant une très grande partie de l'année : prairies permanentes, prairies artificielles ;

— végétaux couvrant le sol d'une végétation dense formant écran : prairies permanentes et artificielles, haricots verts, salades etc.. ;

— végétaux dont certains organes présentent des anticlinaux et des synclinaux favorables à une rétention de l'eau : choux, salades, herbes des prairies (l'eau pouvant s'amasser à la base des feuilles).

— végétaux dont certains organes présentent des aspérités favorables à la rétention des aérosols ; ainsi : inflorescences des graminées dont la morphologie favorise la contamination florale ;

— végétaux dont la cuticule présente suffisamment d'accidents de structure pour ne pas s'opposer à une pénétration des éléments et végétaux dont la cuticule est pauvre en cire (la présence de cire modifiant les phénomènes de tension superficielle entre les gouttelettes et la cuticule et favorisant l'écoulement de l'eau à partir des feuilles) par exemple : pommes de terre, tomates, patates douces, millets.

Il importe cependant de ne pas surestimer *a priori* l'importance relative de la contamination directe, en raison de la faible quantité d'eau retenue par la plante à chaque aspersion.

Le sort ultérieur de l'eau temporairement retenue à la surface d'un organe aérien dépend de nombreux facteurs indépendants de la plante, en particulier de facteurs climatiques dont il importe de tenir compte.

Stades végétatifs et époques des contaminations

Cet aspect du problème a déjà été en partie envisagé (cf. III-1.1) ; les risques de contamination directe sont particulièrement grands pour les végétaux pour lesquels les apports d'eau sont réalisés (irrigation) ou se produisent (retombées) aux périodes où la végétation est physiologiquement jeune, c'est-à-dire où les feuilles sont susceptibles d'absorber très vite les éléments qui parviennent à leur surface.

Conditions dépendant du métabolisme de la plante

Les radioéléments absorbés peuvent soit rester localisés dans l'organe au niveau duquel l'absorption a été réalisée ou bien migrer dans la plante puis se localiser dans d'autres organes : organes de réserve et fruits. Ces différentes éventualités sont liées à des phénomènes métaboliques, les métabolites servant de supports fixes ou de vecteurs étant vraisemblablement des acides organiques. Il s'agit pour le mo-

ment d'une hypothèse de travail, mais on pourrait expliquer de la sorte beaucoup d'observations expérimentales notamment les transferts légèrement différents d'éléments voisins tels Ca et ^{90}Sr et les « discriminations » locales qui en résultent.

En général, le césium-137 migre plus intensément des feuilles aux racines et aux organes de réserve que le strontium-90. ^{137}Cs apporté au feuillage des plantes de pomme de terre est transporté vers les tubercules de la même façon que le potassium. Ce radioélément paraît migrer avec facilité dans la vigne (I.N.R.A.-C.E.A., 1964) et peut s'accumuler dans les fruits (peut-être à l'état de tartrate acide peu soluble). ^{90}Sr qui parvient sur le feuillage migre peu, et tend à s'accumuler sur place dans les feuilles ; à ce point de vue, ce sont donc les légumes dont on consomme les feuilles qui sont critiques pour leur contribution à la contamination de l'homme. Le fer, en principe, devrait s'accumuler sur place, notamment chez les végétaux dont le feuillage est riche en acide oxalique (épinard par exemple). Le zinc-65 devrait migrer assez intensément et s'accumuler surtout dans les fruits et les graines. Si ^{65}Zn est absorbé pendant la floraison, il est vraisemblable qu'il migre peu et contamine les graines, surtout les enveloppes et les germes. Pour ce radioélément, les plantes dont on consomme les graines en entier, devraient être considérées comme des vecteurs importants.

IV. — CONDITIONS LIÉES AUX TECHNIQUES CULTURALES

Plusieurs remarques ont déjà montré l'importance possible des techniques culturales pour la contamination des végétaux.

Divers autres points doivent être soulignés.

Économie de l'eau — Coefficient h

Dans l'expression de R′, contamination de la plante à la limite de saturation du sol :

$$R' = \frac{cbh}{\lambda + \gamma_1 + k_2 c},$$

figure au numérateur h qui est la hauteur d'eau reçue par la plante pendant l'unité de temps (un an ou un cycle de végétation). Il est donc clair qu'une économie d'eau diminuera les risques de contamination et que, au contraire, un apport excessif favorisera la contamination radioactive de la plante.

Ce problème revêt une grande actualité : en raison de l'augmentation rapide de la population mondiale, le problème de la disponibilité de l'eau risque de devenir de plus en plus ardu et il est à craindre qu'on soit conduit à utiliser, tout au moins pour l'irrigation, des eaux très diverses sans souci de leur contamination. Il sera donc de plus en plus nécessaire de réaliser dans les techniques culturales la meilleure économie possible de l'eau.

Des pratiques agricoles traditionnelles évitent un gaspillage de l'eau, par exemple : le *mulching* ou apport superficiel de matières organiques plus ou moins décomposées, les binages dont l'efficacité est d'ailleurs contestée, les diverses techniques

favorisant l'enracinement en profondeur (par exemple : injection d'engrais dans les horizons profonds), celles qui tendent à diminuer l'évapotranspiration potentielle : semis denses, emploi d'abris (BOUCHET, 1963).

L'irrigation demande parfois des apports très importants d'eau qu'il est souhaitable de réduire le plus possible ; il faut noter que, sous climat méditerranéen, l'irrigation par aspersion réalise une économie d'eau de l'ordre de 50 pour cent par rapport à une irrigation au sol (POIRÉE et OLLIER, 1962).

Deux remarques sont à faire à ce sujet :

1° Si l'irrigation par aspersion économise l'eau, elle tend cependant à multiplier les risques de contamination ; en effet, si on admet que c'est l'irrigation qui apportera dans l'avenir la plus grande partie de la radioactivité aux végétaux cultivés, le seul radioélément réellement dangereux sera ^{90}Sr si l'eau est offerte par l'intermédiaire du sol. Par contre, le recours à l'aspersion implique :

a) des risques de contamination directe ; alors ^{137}Cs et peut-être des radioéléments radioinduits peuvent intervenir et :

b) des risques de contamination indirecte où ^{90}Sr est le radioélément critique.

2° L'aspersion n'entraîne une économie d'eau réelle que si elle est pratiquée en dehors des heures chaudes de la journée. De plus, le recours à l'aspersion, durant les heures chaudes, peut augmenter les risques de contamination pour la plante ; en effet, l'absorption directe est favorisée par une élévation de température. D'autre part, les gouttelettes s'évaporent en partie, avant d'arriver sur la plante et leur pollution radioactive peut s'en trouver accrue. Le phénomène d'évaporation est probablement important pour les gouttelettes les plus fines qui, on le sait, sont celles qui se fixent mécaniquement le mieux sur les feuilles et son influence pour la contamination possible de la plante ne doit pas être négligée.

Il importe cependant de ne pas surestimer l'importance relative de la contamination directe : en effet, alors que, pour produire 1 kg de légume frais, il est courant d'apporter au sol 60 kg d'eau d'irrigation, l'eau d'irrigation retenue à chaque aspersion par 1 kg de salade est de l'ordre de 0,1 l. Si la production de cette salade a nécessité 10 aspersions, l'eau d'irrigation qui au total aura été retenue par les parties aériennes de la plante au cours de sa croissance est de l'ordre de 1 kg. L'importance réelle des 2 types de contaminations ne pourra évaluée qu'après un grand nombre d'expériences.

Fertilisation

La fertilisation intervient en modifiant :

— le milieu physico-chimique sol ;

— le milieu nutritionnel sol, les deux aspects étant très souvent connexes. Il est des cas où elle peut indirectement favoriser la contamination radioactive des végétaux cultivés.

Ainsi :

— l'enrichissement des horizons superficiels dans les zones à fortes retombées ou bien irriguées par des eaux contaminées et la pratique du *mulching* ; les racines tendent à rester superficielles et sont particulièrement accessibles aux radioéléments (HÉNIN).

Réponse à la demande commerciale

Le souci de répondre à la demande commerciale peut modifier les risques de contamination pour certains produits. Par exemple, on peut être conduit à cultiver une plante sur un sol qui, en principe, n'est pas le plus favorable, pour obtenir des récoltes présentant un certain nombre de critères très estimés par le consommateur étranger. C'est ainsi que dans les régions méditerranéennes, la culture du fraisier tend à s'étendre sur des sols décalcifiés, très souvent caillouteux (Gress à Gapan) ; les fruits obtenus sont propres, intacts, se prêtent bien à l'expédition, mais, en raison de la nature du sol, les risques de contamination indirecte sont plus grands que pour les fruits cultivés dans leur aire normale.

V. — IMPORTANCE PRATIQUE DU PROBLÈME

L'importance d'un problème concernant directement la contamination de la chaîne alimentaire de l'homme n'est pas à souligner. L'aspect qui est abordé ici présente un intérêt pratique très réel. En effet, alors qu'il y a quelques années, sous l'impulsion d'ailleurs d'auteurs anglo-saxons, on pensait que les vecteurs essentiels de la contamination étaient le lait et les produits laitiers (O.N.U., 1962) ; on admet actuellement que, pour les populations dont le régime alimentaire comporte une consommation assez faible de produits laitiers, les aliments végétaux contribuent pour une part importante à la contamination radioactive. C'est en particulier le cas des Français dont le régime comporte beaucoup de légumes, de produits céréaliers et de fruits. Les facteurs favorables à une contamination des végétaux sont nombreux, comme en témoigne la mise au point précédente (tabl. 2).

Les sols qui, par nature, sont favorables à une contamination indirecte des végétaux sont très représentés. Parmi eux, il en est dont les caractéristiques extrêmes (très forte acidité) excluent pour l'instant l'utilisation agricole. Mais, parmi les sols critiques ou simplement suspects, il en est qui constituent de bons sols de culture. D'ailleurs, l'augmentation des besoins alimentaires résultant de l'accroissement de la population mondiale implique qu'on devra peut-être bientôt utiliser la plus grande surface possible de sols, même si leur vocation culturale est défectueuse. D'autre part, comme cela a été signalé précédemment, l'extension des cultures suppose le recours de plus en plus fréquent et intense à l'irrigation. Si les risques résultant des retombées tendent à diminuer progressivement, il est à craindre que ceux résultant de l'apport d'eau d'irrigation ne prennent le relais.

Les végétaux critiques, c'est-à-dire ceux qui sont les plus intensément contaminables sont très nombreux (tabl. 3). Parmi eux, on trouve la presque totalité des légumes produits et consommés en France et des fruits largement consommés : raisins de table, fraises, pêches, poires, pommes, abricots. Dans la mesure où les issues ne sont pas utilisées, les produits céréaliers contribuent peu à la contamination du régime alimentaire. Les causes de contamination de chacun de ces produits peuvent être variées et beaucoup d'entre elles sont sous la dépendance de facteurs écologiques au sens large du terme.

L'intérêt qu'il y a à localiser les zones sur lesquelles des conditions critiques sont réalisées est clair. Cette étude nécessite un travail préalable, pour définir

d'abord des régions formant des unités géographiques, écologiques et économiques bien délimitées où notamment les risques résultant de l'utilisation des eaux pour les cultures sont homogènes, ensuite pour dégager les divers critères favorables à la contamination radioactive. Cet effort devra être prolongé par une évaluation réelle des risques résultant de chacun des critères grâce à l'utilisation des techniques de la statistique. On pourra alors sur une base logique délimiter des zones « critiques » où le contrôle radiochimique devra être particulièrement sévère, et en indiquant les productions végétales les plus aptes à être contaminées, on contribuera encore à rendre ce contrôle beaucoup plus efficace. L'ensemble de ces efforts associés à des enquêtes alimentaires s'inscrira dans la recherche d'un équilibre entre les impératifs souvent divergents et même contradictoires du développement industriel et de la protection de la biosphère.

SUMMARY

DISCUSSION OF FACTORS PROMOTING THE RADIOACTIVE CONTAMINATION OF CULTIVATED CROPS

Plants take-up from the biosphere radioactive elements originating from radioactive fall-out and irrigation water. The mechanisms of absorption are the same as those operating for stable elements in mineral nutrition.

Similarly to the uptake of elements from the soil by way of roots or by the aerial organs, plants may become contaminated indirectly from the soil by way of their roots or directly by absorbing radioactive elements deposited on their leaves, flowers and fruits.

Due to the colloid complex, radioactivity accumulates in soil ; there is a trend towards an equilibrium between radioactive additions and loss in radioactivity by leaching to the subsoil and uptake by roots. When the radioactivity of the soil reaches the limit value R, plants assume a R′ value that is proportional to R. Equilibrium is rapidly reached with radioactive elements of small and medium half-life, but is reached very much slower with the long-lived isotopes of such as cæsium-137 and strontium-90. These two elements are mainly considered. The R′ values may reach dangerous levels if the plants are grown on soils of low exchange capacity, on acid soils, or on soils in which a superficial development of the root system renders contamination through the water supply more likely. The hazard of indirect contamination is highest with strontium-90.

Direct contamination does not show the cumulative nature of indirect contamination ; it mainly depends on the conditions of water supply and on the properties of the aerial organs.

Cereals may undergo heavy contamination by fixation on the tissues enveloping the flowers, while many legumes with well developed aerial organs may retain part of the radioactivity supplied by rain or irrigation water.

Cultural technics such as method of irrigation and measures taken for economizing with water are important factors in contamination.

A preliminary, and probably incomplete, inventory of « critical » crops includes a large number of plants, the organs of which serve for human alimentation, such as many vegetable crops (cauliflower, lettuce, spinach, tomato), potato, bean and some fruits (pear, apricot, peach, strawberry, and possibly grapes and apple).

ZUSAMMENFASUNG

DISKUSSION DER FÜR EINE RADIOAKTIVE VERSEUCHUNG DER KULTUREN GÜNSTIGEN FAKTOREN

Die Pflanzen nehmen aus der Biosphäre künstliche radioaktive Elemente, die durch Absinken oder durch Beregnungswasser beigebracht werden, auf. Die Absorptionsmechanismen sind die gleichen wie die der Mineralversorgung durch stabile Elemente. Gleich wie die Pflanzen befähigt sind, aus dem Boden mittels Wurzeln oder mittels der oberirdischen Teile Elemente aufzunehmen, so

können sie durch Boden oder Wurzeln infiziert werden oder auch durch radioaktive Elemente, die sich auf Blätter, Blüten und Früchte ablagern.

Infolge seines Absorptionskomplexes speichert der Boden die Radioaktivität ; scheinbar stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Anreicherung und Verluste durch Abnahme der Radioaktivität, durch Wurzelaufnahme und Fortschwemmung in den Untergrund ein. Sobald die Radioaktivität des Bodens einen Grenzwert R erreicht, ist derjenige R′ der Pflanzen proportional zu R. Das Gleichgewicht wird in der Tat sehr schnell für die Elemente mit kurzer oder mittlerer Periode erreicht, viel langsamer hingegen für die zwei langlebigen Isotope : Cesium-137 und Strontium-90. Es wurde besonders der Fall dieser beiden Elemente ins Auge gefasst. R′ kann gefährliche Werte annehmen, wenn die Kulturen auf sauren Böden oder mit sehr geringem Austauschvermögen wachsen, oder auf Böden in denen die oberflächliche Wurzelentwicklung begünstigt wird, da dann die Wurzeln viel mehr für eine Infizierung durch Wasser empfänglich sind. Die Gefahr einer direkten Verseuchung ist besonders für das Strontium-90 bedeutend.

Die direkte Infizierung hat keine der kumuliernden Eigenschaften der indirekten Verseuchung. Sie steht besonders in Abhängigkeit der Art der Wasserzufuhr und der Eigenschaften der oberirdischen Organe. Getreide können weitgehend durch Festlegung auf den Blütenhüllen infiziert werden. Andererseits können zahlreiche Gemüsearten einen Teil der Radioaktivität des Regen- oder Beregnungswassers durch stark entwickelte oberirdische Organe zurückhalten.

Kulturtechniken wie Beregnungsart und Wasserersparnis sind wichtige Faktoren der Verseuchung.

In einem ersten provisorischen, wahrscheinlich unvollständigen Inventar der « kritischen » Gewächse steht eine grosse Anzahl von Pflanzen, deren gewisse Organe die geläufige Nahrung des Menschen darstellen, insbesondere zahlreiche Gemüsearten und Früchte (Blumenkohl, Salat, Spinat, Tomate, Kartoffel, Bohne ; Pfirsich, Aprikose, Birne, Erdbeere, möglicherweise auch Traube und Apfel).

ОБСУЖДЕНИЕ ФАКТОРОВ БЛАГОПРИЯТСТВУЮЩИХ РАДИОАКТИВНОМУ ЗАРАЖЕНИЮ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ.

Р. Биттель.

РЕЗЮМЕ

Растения поглощают из биосферы искуственные радиоэлементы занесенные радиоактивными выпалениями или ирригационными водами. Механизмы поглощения — теже что и для стабильных элементов при минеральном питании. Так как растения поглощают элементы с помощью корней из почвы, или надземных органов из воздуха, то могут они заразиться или косвенным путем, от почвы, при помощи корневой системы, или прямым путем, поглощая радиоэлементы попавшие на листья, цветы и плоды.

Радиоактивность особенно накопляется в почве, благодаря поглотительному комплексу этой последней; в ней наблюдается тенденция к установлению равновесия между получением и потерями, вызванными уменьшением радиоактивности, просачиванием в под-почву и поглотительной способностью корней. Когда радиоактивность почвы достигает своего максимального значения R, радиоактивность растений представляет величину R′ пропорциональную R. В действительности, для радиоэлементов с коротким или средним радиоактивным периодом, равновесие устанавливается довольно быстро, но для двух изотпов с длинным периодом (Цезий-137 и Стронций-90) оно достигается гораздо медленнее. Поэтому автор в особенности разсматривает случаи этих двух элементов. R′ может достичь опасных значений в почвах со слабой емкостью обмена, или кислых, и, еще в случае почв благоприятствующих развитию корневой системы; корни в этом случае гораздо легче заражаются от воды. Риск косвенного заражения особенно велик в случае Стронция-90.

Прямое заражение не имеет ни одной общей черты с косвенным заражением. Оно особенно зависит от способа принесения влаги и от характера надземных органов растения. Злаки легко заражаются от закрепления радиоэлементов на цветочных покровах. Многие овощные растения с сильно развитыми надземными органами способны удержать часть радиоактивности дождевой и ирригационной влаги.

Агротехнические приемы : способ ирригации, мероприятия связанные с экономией влаги, являются важными факторами возможностей заражения.

В первом, временном и, по всей вероятности неполном списке «критических» растений фигурируют многие растения органы которых служат постоянной пищей для человека, в особенно большом количестве — овощи (цветная капуста, салаты, шпинат, помидоры, картофель, фасоль), и некоторые фрукты (персики, абрикосы, груши и, возможно, столовый виноград и яблоки).

TABLEAU 2

Tableau récapitulatif des facteurs favorables à une contamination radioactive des végétaux cultivés
(vecteur de la contamination : l'eau)

A. *Facteurs intervenant avant l'apport de l'eau à la plante* (non étudiés) :

— facteurs des retombées ;
— facteurs hydrologiques du devenir des radioéléments dans les cours d'eau.

B. *Facteurs intervenant pendant ou après l'apport de l'eau à la plante.*

— *Contamination indirecte.*

— *Sols :*

— radioélément le plus dangereux : ^{90}Sr ;
— sols à faible capacité d'échange ;
— sols plus ou moins acides ;
— sols où le développement racinaire superficiel est favorisé ;
— sols dont l'horizon superficiel est riche en « nutrients » ;
— sols hydromorphes.

— *Plantes :*

— tendance spécifique du système racinaire à rester superficiel ;
— forte « CEC » du système radiculaire ;
— migration ascendante rapide du radioélément vers des organes consommés par l'homme ;
— plantes cultivées sur sols légers ou acides ; plantes craignant le calcaire.

— *Contamination directe.*

— *Conditions dépendant de l'apport de l'eau :*

— finesse des gouttelettes contaminées ;
— apport de l'eau aux périodes actives de végétation ;
— eau d'irrigation prélevée dans un cours d'eau en aval de points de rejet radioactifs en des lieux où la radioactivité peut s'accumuler.

— *Conditions dépendant de la plante :*

— aptitude des organes aériens à retenir l'eau ; système foliaire développé, absence de cire, présence d'aspérités ;
— plantes recevant ou réclamant de grandes quantités d'eau au moment où les organes aériens peuvent absorber la contamination : feuillage jeune, époque de la floraison et de l'épiaison (graminées) ;
— métabolisme permettant le transport aisé des radioéléments de l'organe primitivement contaminé à l'organe consommé par l'homme.

— *Techniques culturales :*

— Économie défectueuse de l'eau.
— Apport superficiel intense d'engrais (favorise l'enracinement superficiel).
— Extension des cultures en dehors de leurs aires normales nécessitant une correction du milieu sol et des irrigations intenses.

C. *Facteurs intervenant pendant et après récolte* (non étudiés dans cette mise au point).

TABLEAU 3

Inventaire provisoire des végétaux critiques

Prairies	Contamination directe : couvrent complètement le sol ; contamination par la base.
Luzerne, sainfoin...	Contamination indirecte — légumineuses → ^{90}Sr. Contamination directe : couvrent complètement le sol.
Haricots verts	Contamination par suite de grands besoins d'eau — irrigation. Contamination indirecte : légumineuses → ^{90}Sr.
Pommes de terre	Préfèrent les sols légers. Grand développement des feuilles. Métabolisme : transfert de ^{137}Cs dans les tubercules.
Carottes	Préfèrent les sols légers. Peut-être : métabolisme (?)
Salades	Grand développement des parties aériennes. Arrosages intenses : irrigation. Enracinement superficiel. Cultures maraîchères intensives.
Tomates	Grand développement des parties aériennes. Grand besoin d'eau : irrigation. Enracinement peu profond. Cultures souvent intensives.
Melons	Grand développement des parties aériennes. Cultures sur sols légers, quelquefois acides. Racines superficielles.
Choux et choux-fleurs	Grand développement des parties aériennes. Grand besoin d'eau, choux-fleurs : irrigation.
Cultures maraîchères et légumières diverses	Toujours à surveiller en raison de leur culture intensive, de leurs grands besoins d'eau.
Fraises	Cultivées souvent sur sols non calcaires, mêmes acides. Enracinement superficiel.
Pêchers, abricotiers	Craignent le calcaire — cultivés sur sols légers et souvent acides. Enracinement superficiel. Parfois irrigués.
Poiriers	Craignent le calcaire. Parfois irrigués.
Pommiers	Cultivés sur des sols très divers. Grands besoins d'eau — parfois irrigués.
Raisins de table	La question de savoir s'il s'agit d'une production critique reste posée.
Céréales (sauf riz)	Contamination florale, mais la contamination reste dans les enveloppes florales (^{90}Sr).
Riz	Très grand besoin d'eau, mais pour l'instant, ne semble pas devoir être retenu parmi les végétaux contaminables (?), mais *à surveiller*.
Betteraves	Grand besoin d'eau. Métabolisme (?) *A surveiller*.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIER G., HUGUET F. (Mme), MICHON G.,TYSZKIEWICZ E., 1958. Sur la prévision de la limite d'accumulation dans le sol et dans les récoltes d'éléments radioactifs de longue période apportés à un régime constant. *C. R. Acad. Sci.* (1958), **247**, 2434-6.

BARBIER G., 1963. Prévision de l'infiltration des radioéléments à la limite de la couche labourée des sols agricoles. *C. R. Colloque intern. sur la rétention et la migration des ions radioactifs dans les sols*, 145-150. Éd. Presses universitaire de France

BITTEL R., 1956. *Étude de la solubilisation des éléments utiles aux végétaux en vue de l'appréciation de la fertilité minérale des sols*, Thèse Doctorat ès sciences, Paris.

BITTEL R., 1957. Étude d'une technique de détermination du manganèse actif du sol. *Ann. agron.*, **8**, 91-109.

BITTEL R., CLÉMENT J. L., 1965. *Contamination directe des végétaux et irrigation par aspersion.* Rapport C. E. A., série bibliographique — n° 53

BITTEL R., 1965. Contamination par voie racinaire des végétaux cultivés. Cahiers Ing. agron., n° 194 21-26

BLANC-AICARD D. (Mme), 1955. Études préliminaires sur l'absorption radiculaire des cations. *Ann. agron.* **6**, 615-633.

BOUCHET R. J., 1963 Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. agron.*, **14** (5), 743-824.

Direction des Services agricoles du Vaucluse, 1958. Les cultures légumières du Vaucluse, (1958), Soc. Ed. Vaucluse agricole (Avignon)

ELGABALY M. M., WIKLANDER L., 1949. Effect of exchange capacity of clays minerals and acidoid content of plants on uptake of Na-Ca by excised barley and pea root. *Soil Sci.* **67**, 419-22.

FRIEND A. G., 1963. *The aqueous behavior of* Sr^{85}, Cs^{137}, Zn^{65}, Co^{60} *as determined by laboratory type studies, in TID-7664*, 43-46.

GLIEMEROTH G., 1953. Bearbeitung und Düngung des Unterbodens in ihrer Wirkung auf Wurzelentwicklung, Stoffaufnahme und Pflanzenleistung. *Z. Aker Pflanzenb.*, **96** (1), 1-44.

GLIEMEROTH G., 1959. Stickstoffverlagerung über Winter auf einem lösslœhm in Abhängigkeit von Form, Menge, Termin und Verteilung der Herbstdüngung. *Pflanzenern. Dung. Bokenk*, **85**, 20-31.

GRIM R. E., 1953. *Clay Mineralogy*, Ed. Mc. Graw-Hill, London.

GROLLEAU M., 1964. L'enracinement du pêcher en sol de lœss. *Bas-Rhône-Languedoc*, **23**, 28-36.

HENIN S., 1960 Le profil cultural Éd. Soc. Éd. Ingénieurs agricoles, Paris.

HAGHIRI F., SAYRE J. D., 1961. Sr^{90} uptake by plants as influenced by soil types and liming. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **25**, 120-3.

I.N.R.A.-C.E.A. 1961. Absorption de radioéléments du sol par divers légumes cultivés dans les conditions de la pratique. *Rapport C. E. A. n° 1860.*

I.N.R.A.-C.E.A. 1963. Comptes rendus d'expériences de plusieurs années sur l'absorption du strontium et du césium radioactifs par des plantes cultivées. *Rapport C. E. A. n° 2159.*

I.N.R.A.-C.E.A. 1963 Étude expérimentale de la contamination radioactive des cultures notamment par l'eau d'irrigation. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 611-620.

I.N.R.A.-C.E.A. 1964. Étude expérimentale de la contamination radioactive par l'eau d'irrigation de certaines plantes cultivées. *Rapport C. E. A. N° 2625.*

JYUNG W. H., 1963, Mechanism of ions uptake by the leaves of *Phaseolus vulgaris*, TID-20 160

KORNEGAY B. H., VAUGHAM W. A., JAMISON D. J., MORGAN J. M., 1963. *Transport in freshwater system, TID-7664.*

LAUMONNIER R., 1960. *Cultures fruitières méditerranéennes*, Éd. Baillière Paris

LAUMONNIER R., 1962. *Cultures maraîchères*, Éd. Baillière Paris

MARSHALL C. E., 1949. *The colloid chemistry of the silicate minerals*, Éd. Academic Press.

MARTIN R. P., NEWBOULD, RUSSELL R. S., 1958. *Discrimination between Sr and Ca in plants and soils, in Radioisotopes in Scientific Research.* (Editor R. C. Extermann), Ed. Pergamon Press.

MICHON G., 1964. Les rejets radioactifs dans les eaux destinées à l'irrigation. Health Physics Soc. Ann. Meeting, Cincinnati. *Health Phys.* **10** (8), 597, P 61.

PARKER F., 1963. *Clinch River Studies, in TID-7664*, 161-91.

POIREE M., OLLIER C., 1962. *L'irrigation*, Ed. Eyrolles Paris

RAVEL d'ESCLAPON G., BALLOT R., 1960. *L'arboriculture fruitière méridionale*, Éd. Imprimerie Rhône-Durance, Avignon.

RODIER J., MARICHAL M., SCHEIDHAUER J., COURT T., 1961. *Étude de la dilution dans le Rhône des effluents radioactifs du Centre de Marcoule.* Rapport C. E. A. N° 2003.

RODIER J., MARICHAL M., 1961. Contribution à la dilution des effluents dans le Rhône par le rejet expérimental de rhodamine B. *La Houille Blanche*, **5**, 636-41.

SOUBIÈS, 1952. Migration hivernale de l'azote nitrique dans un sol limoneux de la région toulousaine, *Ann. agron.*, **5**, 365-84.

STILES W., 1961. *Trace elements in plants*, Ed. Cambridge University Press.

SUTCLIFFE J. F., 1962. *Mineral salts absorption in plants*, Ed. Pergamon Press.

TRUOG E., 1961. *Mineral Nutrition of plants*, Ed. univ. Wisconsin Press, Madison.

Ann. agron., 1965, **16** (3), 287-299.

OBSERVATIONS SUR LE BORE DANS LE SOL ET DANS LES PLANTES

I. — Notes analytiques

Dosage colorimétrique du bore total des végétaux et du bore soluble a l'eau des sols au moyen du 1-1' dianthrimide

J. MAURICE et S. TROCMÉ

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

Le 1-1' dianthrimide, réactif colorimétrique du bore, présente par rapport à la quinalizarine un certain nombre d'avantages (précision, sensibilité, moins d'interférence avec d'autres éléments), qui ont permis de le retenir de façon valable pour le dosage du bore. Des modes opératoires sont présentés pour le dosage du bore total des végétaux et du bore soluble à l'eau des sols.

INTRODUCTION

Le dosage de traces de bore, par voie colorimétrique, peut être effectué à l'aide de très nombreux réactifs. Dans une revue bibliographique récente, Capelle (1963) en dénombrait plus de 70. La plupart de ces réactifs sont des dérivés de l'hydroxyanthraquinone, des flavones ou des chalcones, des dérivés à groupement azoïque ou imine, ou des produits à base de curcumine ou de benzoïne. Les plus fréquemment proposés sont les dérivés de l'hydroxyanthraquinone et parmi ceux-ci la quinalizarine, le carmin, le chromotrope 2 B et le 1-1' dianthrimide.

Ces colorants dérivés de l'hydroxyanthraquinone ont comme propriété commune, en particulier, de donner avec le bore en milieu sulfurique concentré une coloration dont l'intensité dépend des quantités présentes de bore et de colorant et de la concen-

tration en acide sulfurique. La nécessité d'opérer en milieu sulfurique concentré peut rendre leur emploi peu commode et explique en partie que le réactif à base de curcumine, en solution dans l'alcool ou l'acétone, ait été souvent préféré. Cependant l'utilisation de solvants organiques n'est pas non plus sans inconvénients et les avantages présentés par ces dernières méthodes ne sont pas tels qu'ils conduisent à rejeter l'emploi de celles qui utilisent l'acide sulfurique concentré.

Les premiers travaux ayant montré la possibilité d'utiliser le 1-1' dianthrimide sont déjà assez anciens (ELLIS et *al.*, 1949) ; mais les possibilités d'utilisation pratique de ce réactif sont relativement récentes. Bien que cette méthode ait déjà fait l'objet d'une bibliographie assez copieuse (voir notamment ELLIS et *al.*, 1949 ; GORFINKIEL et POLLARD, 1952 et 1954 ; MÜLLER, 1957 ; SKAAR et LANGMYHR, 1960), il a paru utile de préciser ou de compléter certains points, et notamment de comparer les possibilités du 1-1' dianthrimide à celles de la quinalizarine, fréquemment utilisée actuellement.

A. — LE COMPLEXE 1-1' DIANTHRIMIDE-BORE

Le 1-1' dianthrimide ou 1-1' dianthraquinoylamine $(COC_6H_4COC_6H_3)_2NH$ donne avec le bore en milieu sulfurique concentré un complexe soluble bleu. Au maximum d'absorption ($\lambda = 6\,200$ Å), la loi de Lambert-Beer est parfaitement suivie, au moins dans l'intervalle 0-2,5 γ de bore selon les conditions opératoires ci-dessous :

1° *Température*

L'élévation de la température jusqu'à une certaine valeur (90°C) permet d'augmenter à la fois la vitesse de formation du complexe et l'intensité de la coloration finale (ELLIS et *al.*, 1949 ; SKAAR et LANGMYHR, 1960). Pratiquement on opère en étuve à 90° réglable à ± 2°C, pendant 3 h. Certains auteurs maintiennent à 80° pendant 5 h.

2° *Colorant*

Le 1-1' dianthrimide, qui précipiterait en fins cristaux rouges dans l'eau ou l'acide sulfurique peu concentré, est dissous pour l'obtention d'une solution-mère à raison de 400 mg dans 100 ml d'acide sulfurique $d = 1{,}83$. Maintenue au froid et à l'abri de la lumière, cette solution est stable pendant plusieurs semaines.

Au moment de l'emploi la solution-mère est diluée au 1/20 dans l'acide sulfurique $d = 1{,}83$.

3° *Concentration en acide sulfurique*

Des variations de concentration en acide sulfurique entraînent des variations de coloration, l'intensité maximale de la coloration étant obtenue pour une concentration finale de 90 p. 100 environ (SKAAR et LANGMYHR, 1960). En conséquence, et bien que la gamme de comparaison et les essais soient à traiter de la même façon, il convient d'éviter aussi bien une perte qu'un gain d'eau au cours des opérations.

On fera donc attention à introduire avec précaution l'acide sulfurique concentré dans la phase aqueuse, pour éviter un échauffement brutal ; les tubes à essais, en verre de chimie, seront maintenus bouchés sauf pendant le temps de séjour à l'étuve.

Une concentration finale en acide sulfurique permettant d'avoir une absorption de lumière suffisante pour apprécier des différences de 0,016 γ de bore (avec le spectrophotomètre dont nous disposions, d'un type courant actuellement) est obtenue en mélangeant 10 ml d'acide sulfurique $d = 1{,}83$, contenant 2 mg de colorant, à 0,7 ml de solution aqueuse d'acide acétique à 25 p. 100 contenant de 0 à 2,5 γ de bore, et à 0,3 ml de solution aqueuse saturée de sulfate d'hydrazine (voir plus loin ce qui concerne l'utilisation de l'acide acétique et du sulfate d'hydrazine).

En définitive, cette méthode apparaît comme nettement plus sensible que la méthode à la quinalizarine, qui ne permettrait d'apprécier que des différences de l'ordre de 0,1 γ.

4° *Solutions étalons*

La gamme est préparée à l'aide d'une solution d'acide borique — par exemple 40,8 γ par ml —, obtenue à partir d'une solution-mère. Des solutions plus diluées se conservent mal, même maintenues au froid et à l'abri de la lumière en flacons de polyéthylène. Les prises d'essais à partir d'une telle solution sont faibles (0,07 à 0,35 ml) mais restent parfaitement réalisables avec une excellente précision au moyen de pipettes de 1 ml graduées au 1/100 de ml.

5° *Interférence d'autres éléments*

L'addition d'une solution aqueuse saturée de sulfate d'hydrazine élimine l'interférence des oxydants susceptibles d'être éventuellement rencontrés dans des échantillons de plantes ou de sols ; les cations tels que Na, K, Ca, Mg, Ba, Zn, Cu, Al, Mn ou les anions tels que PO_4, Cl, F ne gênent pas le dosage, sinon pour des valeurs très élevées (ELLIS et *al.*, 1949 ; BREWSTER, 1951 ; GORFINKIEL et POLLARD, 1952).

Compte tenu de la possibilité de rencontrer du *fluor* à des teneurs parfois notables dans les sols ou les végétaux (parfois plusieurs dizaines de p.p.m., SCHARRER et GOTTSCHALL, 1935), il nous a paru utile de préciser l'interférence de cet élément. Nous avons ainsi constaté que le fluor ne provoque un affaiblissement de la coloration qu'à partir de 20 γ dans le milieu (10 à 20 fois plus que le bore présent) :

γ F ajouté sous forme de FNa	2,5	5	20	50	100	200	250
B retrouvé % de B introduit (pour 1 ou 2 γ B apportés)	98	99	98	92	81	63	54

Nous n'avons pas été en mesure de préciser s'il fallait voir là un caractère propre à la réaction ou si on pouvait envisager une disparition du fluor au cours du chauffage en milieu sulfurique.

Dans des conditions comparables, la coloration du complexe quinalizarine-bore est affaiblie (BOLTZ, 1958) à partir de 3 γ de fluor (en présence de 1 à 8 γ de bore).

Ainsi, le 1-1′ dianthrimide présente à cet égard un net avantage par rapport à la quinalizarine, rendant moins nécessaire d'envisager le cas échéant une distillation préalable de l'ester méthyl borique (BARBIER et CHABANNES, 1953).

En définitive, le 1-1′ dianthrimide exige un chauffage à l'étuve de quelques heures qui n'est pas nécessaire avec la quinalizarine, mais présente par ailleurs les avantages suivants :

— plus grande sensibilité (d'où possibilité notamment d'utiliser des prises d'essais plus faibles permettant une meilleure calcination — voir plus loin, bore dans les plantes) ;

— loi de Lambert-Beer bien suivie, meilleures mesures au spectrophotomètre ;

— peu d'interférence avec le fluor.

Le tableau 1 indique comment pourra être réalisée la gamme de comparaison (0-2,5 γ B).

TABLEAU 1

Établissement d'une gamme de comparaison

Bore en γ	0	0,5	1	1,5	2	2,5
ml eau distillée	0,35	0,28	0,21	0,14	0,07	0,00
ml solution aqueuse de CH_3COOH à 50 %	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
ml solution aqueuse de BO_3H_3 à 40,8 γ/ml	0,00	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35
ml solution aqueuse saturée de sulfate d'hydrazine	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
ml de SO_4H_2 $d = 1{,}83$ contenant 0,2 mg de 1-1′ dianthrimide	10	10	10	10	10	10

L'absorption est mesurée à 6 200 Å dans des cuves de 1 cm. La densité optique est proportionnelle à la concentration en bore et les gammes sont très reproductibles. La coloration du complexe est stable pendant plusieurs heures.

B. — DOSAGE DU BORE TOTAL DES VÉGÉTAUX

La minéralisation par voie humide a été peu retenue jusqu'à présent (risques de pertes, à-blanc élevés et variables).

La calcination est susceptible également de présenter des inconvénients dus à des risques de gains ou au contraire de pertes de bore, si certaines précautions ne sont pas respectées.

Gains de bore.

Dans une publication assez récente, WILLIAMS et VLAMIS (1961), ont attribué la variabilité des résultats obtenus après calcination d'un même échantillon végétal à la contamination en bore à partir des parois de certains fours. Les valeurs extrêmes pouvaient différer entre elles comme de 1 à 8, mais ils constataient que pour des températures et des temps de calcination donnés, on obtenait des valeurs constantes si l'on utilisait des creusets de forme haute ou si l'on recouvrait les capsules avec des couvercles. Peut-être cette condensation de bore dans les cendres végétales serait-elle explicable par l'utilisation de composés du bore pour le revêtement de certains fours (nitrure de bore par exemple).

Pertes de bore.

On sait depuis longtemps (WINSOR, 1948) qu'il peut se produire des pertes de bore au cours de la calcination de tissus végétaux. On a reconnu également que ces pertes pouvaient être diminuées, voire annulées :

— en calcinant à température suffisamment basse (de 450 à 550°C) ;

— en ne prolongeant pas exagérément le temps de calcination (de 1/2 h à 4 h selon les auteurs).

En outre, certains auteurs ont préconisé l'addition d'une base alcalino-terreuse ou de sels de métaux alcalins.

De toute façon, les conditions de calcination doivent être telles que les cendres obtenues soient blanches ou grises.

Pour essayer de préciser ces divers points, nous avons effectué différents essais relatifs à l'utilisation de couvercles ou à l'addition de $Ca(OH)_2$ ou de CO_3K_2.

1° *Emploi de couvercles*

Nous avons comparé les résultats obtenus après calcination de poudres végétales en présence ou en l'absence de couvercles. Nous utilisions des capsules en platine de forme basse à fond légèrement concave, de 45 à 65 mm de diamètre, d'environ 30 mm de hauteur et pouvant recevoir des couvercles en silice ; le fait que la capsule soit couverte est sans inconvénient pour la réalisation d'une bonne calcination lorsque la quantité de matière végétale sèche n'excède pas 500 mg (en l'absence de bases ou de sels, voir 2°). La température de calcination était de 500° ± 10°C pendant 4 h, sans qu'il soit cependant exclu que la température varie quelque peu à l'intérieur du moufle. Une fois refroidies, les cendres sont traitées par une solution d'acide acétique à 25 p. 100. L'ensemble est trituré avec un agitateur, filtré sur papier-filtre sans cendres à filtration lente à l'aide d'entonnoirs en polyéthylène. Après prélèvement de 0,7 ml de filtrat, les conditions opératoires sont les mêmes que celles relatives à l'établissement de la gamme de comparaison à partir de l'addition de solution aqueuse saturée de sulfate d'hydrazine.

Le tableau 2 présente deux exemples, choisis parmi les plus caractéristiques, de l'influence des couvercles. Les capsules de forme et de dimension analogues étaient « appariées » pendant la calcination.

La dispersion des résultats est faible pour les capsules couvertes et on ne peut mettre en évidence aucune influence de la position des capsules dans le four. En

l'absence de couvercles, les valeurs sont au contraire très dispersées et paraissent indiquer une contamination en bore en relation avec la position des capsules dans le four, la contamination maximale étant observée au voisinage du fond du moufle. Ces observations sont donc en accord avec celles déjà mentionnées par WILLIAMS et VLAMIS, 1961. Toutefois, dans d'autres types de fours, il est possible que des contaminations de cette nature soient moins accusées, voire nulles (SERVANT et PIQUARD, 1962).

TABLEAU 2

Influence des couvercles sur le résultat de la calcination

Série de calcination	Avec couvercles				Sans couvercles			
	Bore p.p.m. matière sèche	moyenne	Coefficient de variation en %	Erreur-type de la moyenne	Bore p.p.m. matière sèche	moyenne	Coefficient de variation en %	Erreur-type de la moyenne
A	79,7 79,7 77,4 80,5	79,33	1,69	0,669	136,3 85,9 92,1 72,0	96,58	28,77	13,895
B	79,4 76,3 82,4 79,4	79,38	3,14	1,245	112,9 100,8 86,2 83,2	95,78	14,38	6,885
A + B		79,35	2,33	0,654		96,18	21,12	7,179

2° *Addition de chaux ou de carbonate de potassium*

Nous avons comparé les résultats obtenus sans addition de fixateur, ou avec addition de chaux ou de carbonate de potassium à une poudre végétale : addition de 10 ml d'une solution saturée de $Ca(OH)_2$ ou de CO_3K_2 à 4 p. 100, homogénéisation à l'aide d'un agitateur, évaporation à sec à 90°C. En présence de carbonate de potassium, la calcination avec couvercles comme indiqué ci-dessus ne conduit pas à une destruction complète de la matière organique et on est amené à effectuer une seconde calcination dans des conditions identiques après reprise par 10 ml d'eau, homogénéisation et évaporation à sec. Le tableau 3 indique, en accord avec d'autres déterminations non signalées ici, les résultats obtenus sur luzerne ou tubercules de pommes de terre.

Les résultats un peu plus faibles obtenus après addition de CO_3K_2 (significatifs pour les pommes de terre) peuvent être attribués à une destruction incomplète de la matière organique. La calcination effectuée en présence de chaux ne donne pas de résultats différents de ceux obtenus après calcination simple, même sur des végétaux renfermant initialement peu de calcium comme les tubercules de pommes de terre.

Ainsi l'addition d'eau de chaux ne paraît pas utile (cf. également BERGER et

TRUOG, 1939 ; BARBIER et CHABANNES, 1953), même si l'on suit une méthode dont les résultats ne sont guère influencés par la présence de fluor (on sait en effet que l'addition d'un alcali peut être critiquable si, en augmentant la quantité de fluor retenu au cours de la calcination, elle risque d'augmenter l'interférence de cet élément).

TABLEAU 3

Influence de l'addition d'un fixateur avant la calcination d'une poudre végétale

	Sans addition (1 calcination)				+ $Ca(OH)_2$ (1 calcination)				+ CO_3K_2 (2 calcinations)			
	Bore p.p.m. matière sèche	moy.	coeff. de variat. en %	erreur type de la moy.	Bore p.p.m. matière sèche.	moy.	coeff. de variat. en %	erreur type de la moy.	Bore p.p.m. matière sèche.	moy.	coeff. de variat. en %	erreur type de la moy.
Luzerne	57,9 57,9 58,4 61,2	58,85	2,69	0,792	56,9 57,9 59,5 60,5	58,70	2,74	0,804	58,7 56,2 55,5 57,6	57,00	2,51	0,715
Tubercules de pommes de terre	4,6 4,6 4,5 4,7	4,6	1,77	0,041	4,3 4,3 4,6 4,8	4,5	5,44	0,123	4,4 4,3 4,5 4,1	4,325	3,95	0,085

3° *Reprise des cendres*

Les cendres sont reprises à l'acide acétique suffisamment concentré. Exemple : pour des échantillons riches en chaux (feuilles d'arbres fruitiers en fin de végétation), il nous est apparu que la reprise était meilleure avec de l'acide acétique à 25 p. 100 qu'avec de l'acide à 5 p. 100 (500 mg de poudre végétale, reprise avec 4 ml d'acide) :

Concentration acide acétique	5 %	15 %	25 %
Bore p.p.m. matière sèche.....	30,7	32,6	34,0

(différence non significative entre 15 et 25 p. 100).

4° *Contrôles avec addition d'acide borique*

Après addition à une poudre végétale d'une quantité connue de bore sous forme d'acide borique en solution, homogénéisation, évaporation à sec et calcination en présence de couvercles sans addition de fixateur, nous obtenons les résultats suivants (en accord avec d'autres résultats non présentés ici) :

Bore dosé dans la prise d'essai	Bore dosé après addition de 0,25 γ
1,66 ± 0,02 γ	1,92 ± 0,02 γ

En définitive, le bore apporté étant retrouvé dans la limite des erreurs expérimentales, nous avons retenu la calcination avec couvercles et sans addition de bases.

Mode opératoire pour le dosage du bore total des végétaux

— calciner 0,2-0,5 g de poudre végétale dans des capsules (de préférence en platine) avec couvercles, à 500°C pendant 3 à 4 h après montée progressive de la température ;
— reprendre avec précaution par 3 à 10 ml (selon la teneur présumée en B) d'acide acétique à 25 p. 100 et homogénéiser soigneusement (on peut humidifier les cendres par une quantité connue d'eau et ajouter ensuite de l'acide acétique à une concentration convenable) ;
— filtrer sur papier-filtre sans cendres à filtration lente en utilisant un entonnoir en polyéthylène et en recueillant dans un tube à essais en verre de chimie ;
— introduire 0,7 ml du filtrat dans un tube à essais en verre de chimie, ajouter 0,3 ml de solution saturée de sulfate d'hydrazine, puis 10 ml d'acide sulfurique $d = 1{,}83$ renfermant 200 mg de 1-1′ dianthrimide par litre. Entre chaque addition de réactif les tubes sont maintenus fermés avec des bouchons de polyéthylène en très bon état ;
— préparer la gamme de comparaison dans les mêmes conditions (voir p. 288) ;
— faire développer la couleur à l'étuve à 90° ± 2°C pendant 3 h, les tubes étant recouverts d'une plaque en verre ;
— laisser refroidir en maintenant les tubes bouchés ;
— colorimétrer à 6 200 Å dans des cuves de 1 cm.

C. — DOSAGE DU BORE SOLUBLE A L'EAU BOUILLANTE DES SOLS

L'extraction du bore soluble à l'eau bouillante, proposée il y a déjà longtemps par Berger et Truog, (1939), est encore fréquemment utilisée pour la détermination de l'aptitude des sols à alimenter les plantes en bore. L'extraction est réalisée par ébullition à reflux pendant 5 mn, le rapport sol/eau variant selon les auteurs de 1/2 à 1/5 [1]. Compte tenu de la sensibilité de la méthode au 1-1′ dianthrimide, nous avons essayé d'apprécier diverses causes d'erreur attribuables à des pertes ou à des contaminations en bore au cours du dosage.

1° *Pertes en bore*

On sait que l'acide borique en solution aqueuse est entraînable par la vapeur d'eau (Pascal, 1961). Le phénomène se produit déjà à la température de 15° (Tchijewski, 1884), mais est d'autant plus accusé que la température est plus élevée. La quantité de bore ainsi entraînée augmente avec la concentration de la solution, moins que proportionnellement. Au cours de l'ébullition, cette perte de bore est évitée par l'utilisation d'un réfrigérant à reflux. Après ébullition, il y a lieu de limiter au maximum les pertes qui pourraient se produire soit au cours du refroidissement, soit au cours de l'évaporation de l'extrait effectuée avant la calcination destinée à détruire les matières organiques :

a) *Refroidissement de l'extrait aqueux.*

A la fin de l'ébullition, le ballon dans lequel a été effectuée l'extraction du bore doit être d'abord suffisamment refroidi tout en étant maintenu au contact du réfrigérant à reflux, afin d'éviter les pertes de bore par entraînement à la vapeur d'eau.

(1) Voir note infrapaginale p 297.

b) *Évaporation à sec de l'extrait aqueux.*

Une fois refroidi, le mélange précédent est filtré aussitôt, après addition de 0,5 ml d'une solution de $CaCl_2$ 2 N. Une partie aliquote du filtrat doit être évaporée à sec avant calcination. Nous avons cherché à voir dans quelle mesure les pertes de bore sont alors évitées par alcalinisation de l'extrait : à des quantités croissantes de solution aqueuse d'acide borique (en l'absence de toute matière organique), nous avons ajouté, parmi les réactifs alcalins parfois proposés, 10 ml de solution aqueuse saturée de chaux (GORFINKIEL et POLLARD, 1952) ou 0,25 ml de solution aqueuse de carbonate de potassium à 40 p. 100 (BERGER et TRUOG, 1939), et évaporé à sec à l'étuve à 90 ± 2°C. Le tableau 4 indique les résultats obtenus après reprise à l'acide acétique à 25 p. 100.

TABLEAU 4

Influence de l'addition d'une substance alcaline sur la perte de bore au cours d'une évaporation à sec, non suivie de calcination

Bore apporté en γ	+ 10 ml de $Ca(OH)_2$ 0,045 N Bore retrouvé en γ	+ 0,25 ml de CO_3K_2 à 40 % Bore retrouvé en γ
0,30	0,20	0,28
0,60	0,39	0,55
0,90	0,67	0,86
1,20	0,94	1,22
1,50	1,21	1,46
1,80	1,43	1,82
2,10	1,75	2,10

En présence de chaux, il apparaît que les pertes sont notables, surtout, en valeur relative, pour les faibles concentrations. En présence de carbonate de potassium, le bore apporté est sensiblement retrouvé, sans doute parce qu'avec le carbonate de potassium le pH se maintient à des valeurs plus élevées qu'avec l'eau de chaux. Le carbonate de potassium apparaît donc comme préférable à la chaux, au moins dans les conditions indiquées. Bien entendu on ne pourrait affirmer à la suite de ces essais qu'il n'y ait aucune perte de bore au cours des différentes opérations.

2° *Contaminations en bore*

a) *Eau.*

Bien que les dosages à-blanc permettent en principe d'éliminer l'influence de la teneur en bore de l'eau (et du matériel d'extraction), on conçoit cependant qu'on ait intérêt à avoir une teneur en bore aussi faible que possible : meilleure extraction du bore soluble, meilleures conditions de dosage, etc.

Dans une eau déminéralisée par échange ionique sur résines et d'une résistivité supérieure à 500 000 ohms-cm, la teneur en bore peut varier de 20 à 200 γ par litre selon la période de marche des résines ; par contre, une eau distillée (après passage sur résines) en présence d'acide sulfurique et de permanganate de potassium dans

un appareil en pyrex, et conservée dans un flacon en polyéthylène, ne contient que des traces de bore (les dosages étant effectués après évaporation à sec à 90°C d'un volume d'eau déterminé et calcination). Il est possible, sans que l'on puisse proposer d'explication définitive, que le bore en présence d'acide sulfurique passe rapidement dans les premières fractions distillées, qui sont normalement rejetées. En définitive, rapportée à 1 g de sol pouvant contenir de 0,2 à 2 γ de bore soluble à l'eau, la valeur de l'à-blanc attribuable à l'eau d'extraction pourrait dépasser 1 γ avec une eau bipermutée, mais reste inférieure à 0,03 γ avec une eau distillée dans les conditions indiquées ci-dessus.

b) *Matériel d'extraction et de filtration.*

L'extraction du bore est réalisée dans un ballon en verre d'Iéna relié à un réfrigérant à reflux à tube intérieur en silice. Le ballon en verre d'Iéna cède des quantités de bore qui augmentent avec le temps d'ébullition. Pour l'ébullition de 5 mn normalement réalisée, les quantités de bore cédées restent faibles, et du même ordre de grandeur que celles trouvées dans l'eau distillée (c'est-à-dire 0,03 γ pour 1 g de sol).

L'emploi d'entonnoirs et de béchers en polyéthylène, de tubes à essais en verre de chimie et de papier-filtre sans cendres n'a conduit à aucune contamination décelable.

c) *Influence du temps d'ébullition.*

La teneur en bore soluble d'un sol ne dépend pas du temps d'ébullition, au moins à l'intérieur de l'intervalle de temps considéré ici (tabl. 5).

TABLEAU 5

Influence du temps d'ébullition sur la teneur en bore extractible à l'eau

Temps d'ébullition en minutes	5	6	7	20
Nombre d'extractions	6	3	3	2
à-blanc en γ (pour 1g de sol)	0,06	0,07	0,10	0,17
p. p. m. bore soluble (valeur moyenne)	1,10	1,09	1,09	1,10

d) *Reproductibilité de la technique utilisée.*

En soumettant une solution d'acide borique de titre connu à l'ensemble des phases opératoires, dans les mêmes conditions que pour le dosage du bore soluble du sol, nous avons obtenu les résultats suivants :

Bore apporté : 1,74 γ.

Bore retrouvé : 1,78, 1,73, 1,77, 1,70, 1,76, 1,75 γ
moyenne : 1,748 ;
coefficient de variation : 1,67 p. 100 ;
écart-type de la moyenne : 0,0119.

Sur des échantillons de sol soigneusement homogénéisés à l'agitateur mécanique, nous avons obtenu pour divers sols une reproductibilité très satisfaisante (tabl. 6).

TABLEAU 6

Bore soluble à l'eau. Variabilité des résultats.

N° de l'échantillon	Nombre d'extractions	Valeur moyenne en p.p.m.	Valeurs extrêmes (min.)	Valeurs extrêmes (max.)	Coefficient de variation en %	Écart-type de la moyenne
1	3	0,21	0,21	0,22	2,72	0,002 9
2	4	0,23	0,20	0,27	13,60	0,015 5
3	4	0,82	0,80	0,85	2,51	0,010 3
4	4	0,88	0,86	0,90	1,94	0,008 5
5	6	0,11	0,09	0,13	14,44	0,001 9
6	6	0,18	0,17	0,19	5,41	0,004 0
7	6	1,10	1,08	1,13	1,78	0,008 0
8	6	1,74	1,70	1,77	1,66	0,011 8
9	4	1,46	1,44	1,48	1,12	0,008 2

MODE OPÉRATOIRE PRATIQUE

POUR LE DOSAGE DU BORE SOLUBLE A L'EAU DES SOLS

— placer 25 g de terre tamisée à 2 mm dans un ballon de 250 ml en verre d'Iéna à long col ;
— ajouter 50 ml d'eau distillée (ou 10 g de terre dans 50 ml) (1) ;
— relier à un réfrigérant à reflux à tube intérieur en silice ;
— soumettre à l'ébullition pendant 5 mn ;
— refroidir à l'eau sans enlever le ballon ;
— ôter le ballon et terminer le refroidissement dans un courant d'eau froide ;
— ajouter 0,5 ml de $CaCl_2$ 2 N ;
— filtrer aussitôt ;
— prélever une partie aliquote du filtrat, par exemple 30 ml, ;
— évaporer à sec à 90°C en capsules de platine, en présence de 0,25 ml de CO_3K_2 à 40 p. 100 ;
— terminer comme pour le dosage du bore total des végétaux (calciner, reprendre avec l'acide acétique, etc.) ;
— faire des à-blanc dans les mêmes conditions.

Reçu pour publication en juin 1965.

SUMMARY

OBSERVATIONS ON BORON IN SOILS AND PLANTS.

I. — ANALYTICAL NOTES

COLORIMETRIC DETERMINATION OF TOTAL BORON IN PLANTS AND OF WATER SOLUBLE BORON IN SOILS BY MEANS OF 1-1′ DIANTHRIMIDE.

A rather detailed bibliography had been published in the last few years on the colorimetric determination of total boron in plants and of water soluble boron in soils by means of 1-1′ dianthrimide. Nevertheless, it appears useful to enlarge on certain points and to compare the potentialities of 1-1′ dianthrimide with those of quinalizarine often utilized.

(1) Pour la comparaison de terres entre elles, il y a lieu de noter que les valeurs obtenues varient notablement avec le rapport terre/eau (pouvant être par exemple 1,5 fois plus élevées avec un rapport 1/5 qu'avec un rapport 1/2). Rappelons que la méthode BERGER et TRUOG comporte un rapport terre/eau = 1/2.

Though application of 1-1′ dianthrimide requires heating in the oven for some hours, which is not necessary with quinalizarine, it offers the following advantages :

— better values yielded by spectrophotometry (good accordance with the law of Lambert-Beer) ;
— much higher sensitivity ;
— greater stability of colour ;
— little interference by fluorine, rendering preliminary distillation of boron in the form methyl ester less important.

A study was also made of the effect of added fixing agent during evaporation and calcination, use of lids during calcination, conditions of taking-up of the plant ashes and possible contaminations from water or equipment.

Practical methods of determining total boron in plants and water-soluble boron in soils are described.

ZUSAMMENFASSUNG

BEOBACHTUNGEN ÜBER BOR IM BODEN UND IN DEN PFLANZEN

I. — ANALYTISCHE NOTIZEN

KOLORIMETRISCHE BESTIMMUNG DES GESAMTBORS IN DEN PFLANZEN UND DES IM BODENWASSER LÖSLICHEN BORS MITTELS 1-1′ DIANTHRIMID

Die kolorimetrische Bestimmung des Gesamtbors in den Pflanzen und des im Bodenwasser löslichen Bors, mittels 1-1′ Dianthrimid war in den letzten Jahren Gegenstand einer ziemlich umfangreichen Literatur. Es war jedoch notwendig einige Punkte näher zu bestimmen oder zu ergänzen, und besonders die Möglichkeiten des 1-1′ Dianthrimids mit dem oft gebräuchlichen Chinalizarin zu vergleichen.

1-1′ Dianthrimid muss einige Stunden im Trockenschrank erwärmt werden, was für Chinalizarin nicht notwendig ist, hingegen aber folgende Vorteile aufweist :

— besseres Messen mit Spektrofotometer (gute Anlehnung an das Gesetz von Lambert-Beer) ;
— viel grössere Empfinflichkeit ;
— wenig Interferenz mit Fluor, was die vorhergehende Destillation des Bors mit Methyl.-borsaurem Ester weniger notwendig macht.

Ausserdem werden der Einfluss der Hinzufügung eines Bindemittels bei Verdunstung und Verglühen, die Verwendung von Deckeln beim Verglühen, die Bedingungen der Aufnahme der Pflanzenasche, die gelegentlichen Infizierungen durch Wasser oder Material untersucht.

Alsdann werden praktische Methoden zur Bestimmung des Gesamtbors in den Pflanzen und des im Boden löslichen Bors gezeigt.

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ ДОЗАЖ ОБЩЕГО БОРА РАСТЕНИЙ И ВОДНОРАСТВОРИМОГО БОРА ПОЧВ ПРИ ПОМОЩИ 1-1′ ДИАНТРИМИДА.

Ж. Морис и С. Трокмэ.

РЕЗЮМЕ

Колориметрический дозаж общего бора растений и воднорастворимого бора почв при помощи 1-1′ Диантрамида является сюжетом уже довольно обширной библиографии за последние годы. Авторы сочли нужным, однако, уточнить и развить некоторые пункты, в частности сравнить возможности 1-1′ Диантрамида с возможностьями довольно часто употреблявшегося хинолизарина.

В противовес хинолизарину, 1-1′ Диантрамид требует нагревания в течении нескольких часов в сушильном шкафу, но с другой стороны, он представляет следующие удобства :

— Лучшее измерение с помощью спектрофотометра (хорошо следует закону Ламберта-Беера).

— Большая чувствительность.

— Большая стабильность окраски.

— Меньшая интерференция с флуором, разрешающая таким образом обойтись без предварительной дистилляции бора в форме метил-борного эстера.

Проведено было также изучение влияния фиксатора прибавленного при испарении и озолении, накрытия крышками при сжигании, условий растворимости растительной золы и возможных загрязнений от воды и от материала.

Авторы предлагают практический метод дозажа общего бора растений и воднорастворимого бора почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIER G., CHABANNES J., 1953. Contribution à l'étude du bore dans le sol et les plantes. *Ann. agron.*, **23**, 27-43.

BERGER K. C., TRUOG E., 1939. Boron determination in soils and plants using the quinalizarin reaction. *Ind. Eng. Chem.*, **11**, 540-5.

BOLTZ D. F., 1958. *Colorimetric determination of nonmetals*, 1 vol. Interscience Publishers, Inc., New York.

BREWSTER D. A., 1951. Colorimetric determination of boron in Al with 1-1′ dianthrimide. *Analyt. Chem.*, **23**, 12, 1809-11.

CAPELLE R., 1963. Le dosage du bore. Techniques utilisées. Bibliographie. *Chimie analytique*, **45**, 6, 303-15.

ELLIS G. H., ZOOK E. G., BAUDISCH O., 1949. Colorimetric determination of boron using 1-1′ dianthrimide. *Analyt. Chem.*, **21**, 1345-8.

GORFINKIEL E., POLLARD A. G., 1952. A modified procedure for determining boron in plant material and soils using 1-1′ dianthrimide. *J. Sci. Food Agric.*, **3**, 622-4.

GORFINKIEL E., POLLARD A. G., 1954. The 1-1′ dianthrimide method for determination of boron in soils : further observations. *J. Sci. Food Agric.*, **5**, 136-9.

MÜLLER F. W., 1957. Serienmässige Borbestimmung in Böden mittels der Heisswasserextraktion nach BERGER und TRUOG. *Landwirtsch. Forschung*, **10**, 1, 32-5.

PASCAL P., 1961. *Nouveau Traité de Chimie minérale*, 1 vol., tome 6, Masson et Cie, Éditeurs, Paris.

SCHARRER K., GOTTSCHALL R., 1935. Zur Methodik der Bestimmung kleinster Mengen Borsäure. *Z. Pflanz.*, **39**, 178-97.

SERVANT M., PIQUARD J., 1962. A propos du dosage du bore dans les tissus végétaux. *Oléagineux*, 3.

SKAAR O. B., LANGMYHR F. J., 1960. Effect of temperature and concentration of SO_4H_2 on the rate of formation of the boron 1-1′ dianthrimide complex. *Acta Chem. Scand.*, **14**, 550-5.

WILLIAMS D. E., VLAMIS J., 1961. Boron analysis of plant tissue. *Soil Sci.*, **92**, 161-5.

WINSOR H. W., 1948. Boron microdetermination in fresh plant tissue. *Analyt. Chem.*, **20**, 2, 176-81.

Ann. agron., 1965, **16** (3), 301-321.

OBSERVATIONS SUR LES EFFETS A LONG TERME DES FUMURES ORGANIQUES ET MINÉRALES SOUS CLIMAT MÉDITERRANÉEN

I. — Action sur les rendements

J. MULLER
avec la collaboration technique de M. Granier

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, Antibes (Alpes-Maritimes)

SOMMAIRE

Les essais de fertilisation de longue durée entrepris au Jardin d'Essais de Grasse, avec un rythme biennal d'apport des matières organiques, nous ont permis de comparer les effets à long terme des fumiers, de la paille enfouie avec ou sans compléments minéraux et des fumures minérales à égalité de N, P, K pour des niveaux variés de fertilisation.

Dans la première partie de ce mémoire, nous décrirons les dispositifs expérimentaux et nous examinerons les actions sur les rendements.

Sur l'ensemble des essais, les effets résiduels des fumures organiques ont été beaucoup plus marqués que ceux obtenus avec les fumures minérales. Les effets résiduels de la paille sont très importants.

L'emploi des engrais minéraux à un même niveau de fourniture N, P, K que celui des fumures organiques permet en action directe d'obtenir des rendements toujours plus élevés que ceux obtenus avec les fumures exclusivement organiques, sans pouvoir déceler, entre 1948 et 1962, de diminution de rendement.

Dans le cas de la fumure à la paille, où l'on procède à une fumure organique avec compléments minéraux, les augmentations de rendement du traitement paille par rapport au traitement minéral ne deviennent appréciables que pour des niveaux élevés de fertilisation minérale azotée, supérieurs à 200kg/ha pour une période de 2 ans et pour des apports importants de paille enfouie, supérieurs à 20 t/ha pour cette même période.

INTRODUCTION

L'étude des variations de la teneur en matières organiques, en carbone ou en azote total du sol suivant le système de culture et de fertilisation, résulte de la nécessité de connaître, pour une région et des types de sol déterminés, le sens de cette

évolution, sa vitesse et les caractéristiques agronomiques éventuelles d'un état d'équilibre.

Il tombe sous le sens qu'un tel objectif représente pour un pays une masse considérable d'expériences de longue durée, exploitées de façon exhaustive par les différentes techniques d'analyses physiques, chimiques ou biologiques dont nous pouvons maintenant disposer. Faute d'une telle documentation de base, les discussions sur l'humus dans ses relations avec la fumure minérale et les systèmes culturaux ne reposent que sur des données insuffisantes.

En effet, les expériences de longue durée destinées à l'étude de cette question sont assez rares dans le monde entier et leur programme est extrêmement hétérogène. La plupart de ces expériences envisagent un certain nombre de questions relatives aux rendements ; l'évolution du sol au bout d'un certain temps n'ayant été appréciée le plus souvent que sous des aspects fragmentaires.

Nous ramènerons, ainsi que le faisait DROUINEAU (1963) dans son étude sur « les fumures minérales et les fumures organiques », les questions posées par l'étude des effets à long terme de la matière organique à quatre points essentiels.

A. *Quel est le rendement possible pour les cultures d'un assolement déterminé quand on compare des parcelles recevant uniquement ou bien des fumures organiques ou bien des fumures minérales?*

C'est à ce type de questions que répondent les expériences de longue durée dont les plus connues se situent à Rothamsted (Angleterre) depuis 1848, Grignon (France) depuis 1875, Halle (Allemagne) depuis 1879, Askov (Danemark) depuis 1894 et Riverside (U. S. A) depuis 1927.

L'examen de ces diverses expériences fait apparaître l'extrême diversité des protocoles. Cette diversité apparaît encore mieux en se reportant au tableau 1 où nous avons fait figurer, dans la mesure du possible, la part des fumures organiques et des fumures minérales.

Pratiquement, tous ces dispositifs ont vu leur protocole modifié au cours du temps soit dans le système de fertilisation soit dans le système de culture si bien que les résultats obtenus d'une période à l'autre se raccordent difficilement. Aucun de ces dispositifs ne réalise dans la comparaison des fumures organiques et minérales, l'égalité d'apport N, P, K, il est pourtant fondamental d'apporter des quantités voisines ou égales de N, P, K, si l'on veut comparer les actions des fumures organiques et minérales dans l'étude des effets à long terme.

B. *La deuxième question est relative à l'importance des résidus de récolte engendrés par les fumures minérales*

Il s'agit de savoir si les fumures minérales appropriées à un site et à une culture sont capables d'engendrer des résidus de récolte en quantités telles que l'apport de matière organique au sol réalisé par leur enfouissement contribue de façon substantielle au maintien de son état humique.

Les dispositifs anciens visant à répondre à la précédente question pouvaient fournir des éléments d'appréciation de l'importance des résidus de récolte. Malheu-

TABLEAU I

Fertilisation des principaux dispositifs expérimentaux de longue durée.
Fumure apportée, exprimée en kg/ha/an, (les fumures et rotations indiquées sont celles actuellement pratiquées).

Expér.	Désignation des Traitements	N			P_2O_5			K_2O			Rotation
		org.	min.	total	org.	min.	total	org.	min.	total	
Broadbalk Field	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Blé continu avec jachère 1 an sur 5
	Fumier 35 t/ha	220	0	220	(x)	0	—	(x)	0	—	
	Fumure minérale sans N	0	0	0	0	70	70	0	122	122	
	Fumure minérale complète :										
	2 niveaux N nitrique 1	0	51	51	0	70	70	0	122	122	
	1 et 2 2	0	102	102	0	70	70	0	122	122	
	3 niveaux N ammoniacal 3	0	153	153	0	70	70	0	122	122	
	1, 2 et 3										
Hoosfield	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Orge continu
	Fumier 35 t/ha	220	0	220	(x)	0	—	(x)	0	—	
	Fumure minérale sans N	0	0	0	0	70	70	0	122	122	
	Fumure minérale complète :										
	N nitrique ou ammoniacal	0	51	51	0	70	70	0	122	122	
Woburn	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Blé — Betterave
	Fumier 15 t/ha	92	0	92	(x)	0	—	(x)	0	—	
	Fumure minérale sans N	0	0	0	0	61	61	0	30	30	
	Fumure N :										
	2 niveaux N nitrique	0	23	0	0	0	0	0	0	0	
	N ammoniacal	0	46	46	0	0	0	0	0	0	
	Fumure minérale complète :										
	1 niveau nitrique ou ammoniacal	0	23	23	0	61	61	0	30	30	
Grignon	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Blé — Betterave
	Fumier 10 t/ha	50	0	50	20	0	20	60	0	60	
	Fumure minérale complète	0	84	84	0	90	90	0	60	60	
	Fumure minérale partielle :										
	N-K	0	84	84	0	0	0	0	84	84	
	N-P	0	84	84	0	90	90	0	0	0	
	P-K	0	0	0	0	90	90	0	84	84	
Halle	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Seigle continu
	Fumier 12 t/ha	65	0	65	45	0	45	75	0	75	
	Fumure minérale complète	0	40	40	0	56	56	0	90	90	
	Fumure minérale partielle :										
	P-K	0	0	0	0	56	56	0	90	90	
	N	0	40	40	0	0	0	0	0	0	
Askov	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Assolement quadriennal : blé d'hiver, plantes sarclées, blé d'été légumineuses
	Fumier 7 t/ha	35,9	0	35,9	18,7	0	18,7	39,7	0	39,1	
	14 t/ha	71,8	0	71,8	36,5	0	36,5	78,3	0	78,3	
	21 t/ha	117,7	0	117,7	55,2	0	55,2	117,4	0	117,4	
	Fumure minérale N-P-K :										
	0,5 niveau	0	34,5	34,5	0	19,5	34,5	0	42	34,5	
	1,0 niveau	0	69,0	69,0	0	39,0	69,0	0	84,1	69,0	
	1,5 niveau	0	103,5	103,5	0	58,5	103,5	0	126,1	103,5	
Riverside	Sans engrais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Orangers Washington-navel
	Fumier	390	0	390	(x)	0	—	(x)	0	—	
	Fumure minérale complète	0	390	390	0	130	130	0	130	130	
	Fumure minérale partielle :										
	N-K	0	390	390	0	0	0	0	130	130	
	N-P	0	390	390	0	130	130	0	0	0	
	Fumier + N minéral à divers niveaux	0	390	390	0	0	0	0	0	0	
		65	325	390	0	0	0	0	0	0	
		195	195	390	0	0	0	0	0	0	
		390	0	390	0	0	0	0	0	0	

(x) = Valeur non indiquée par les auteurs.

reusement, les fumures comme les variétés ont évolué et il devient apparent que les dispositifs anciens, difficilement modifiables sont périmés en ce qui concerne les fumures minérales. Les quelques données valables concernent uniquement les résidus de récolte obtenus en grande culture, céréales essentiellement, (GERICKE, 1943 ; BOHNE et *al.*, 1951; ALLISON, 1955). Dans le cas des cultures maraîchères, mis à part le travail de FROEHLICH (1956), on manque totalement de données.

L'appréciation des résidus de récolte, espèce par espèce, est pratiquement impossible en culture au champ et il paraît difficile d'extrapoler leur importance à partir de résultats obtenus en culture en pot. Une évaluation indirecte pourrait être tentée pour un assolement déterminé à partir de la comparaison des résultats obtenus sur des parcelles soumises à des niveaux variés de fertilisation minérale, mais de tels dispositifs doivent avoir au moins dix ans pour que l'on puisse étudier les effets à long terme.

C. *La troisième question se rattache à l'étude des assolements permettant d'obtenir avec les fumures minérales le maximum de résidus humiques*

Les études de ce type ont été beaucoup plus nombreuses en Amérique du Nord qu'en Europe. Sans vouloir faire une bibliographie exhaustive de la question, nous citerons parmi les essais effectués en Amérique du Nord ceux de PEEVY (1940), DODGE (1948), ROYER (1948), BRAGE (1952), COPE (1958) aux États Unis, ceux de BISHOP (1954) et de Mc LEOD (1960) au Canada. En Europe, ces essais sont beaucoup moins nombreux ; nous citerons ceux de WISSELINK (1961) en Hollande. Ces études n'ont qu'un intérêt local et il est nécessaire, pour utiliser ces résultats de disposer de surfaces importantes et de conditions écologiques analogues à celles du dispositif expérimental.

Il convient de noter également que les conditions économiques peuvent perturber les rotations, ce qui est actuellement très fréquent.

D. *La quatrième question relative aux effets à long terme concerne le problème des enfouissements de pailles*

Ce problème est posé depuis une vingtaine d'années par l'utilisation des moissonneuses batteuses et par la rareté du fumier. Les dispositifs expérimentaux de création récente adaptés à l'étude de ce problème présentent des systèmes de fertilisation plus à même de satisfaire les exigences de l'agriculture moderne que la plupart des dispositifs cités dans le paragraphe « A ».

Parmi les premiers essais nous retiendrons ceux entrepris dès 1922 par HOLTZ et VAN DECAVEYE (1938), en climat semi-aride dans l'État de WASHINGTON (U. S. A). Ces auteurs se proposaient, dans ces essais, d'apprécier les effets d'application régulière de quantités définies de diverses matières organiques et d'engrais azotés sur la fertilisation du sol. Ces essais comportent plusieurs types de matière organique : paille de blé, foin de luzerne, fumier.

Bien que l'équilibre PK des parcelles ne soit pas assuré, cette expérience est à retenir car elle fournit des observations particulièrement intéressantes sur la variation du niveau azote organique du sol en fonction des doses variables d'azote minéral

pour un même niveau d'apport de paille, 3 t/ha/an, représentant un apport de 12 kg d'azote. Ainsi, pour la période 1922-1934, la teneur en azote du sol des parcelles traitement paille uniquement a diminué de 58 kg/ha alors que celle des parcelles paille avec complément minéral azoté de 65 kg de N/ha/an (nitrique ou ammoniacal) a augmenté de 110 à 120 kg par hectare.

A Rothamsted, en 1933, fut mis en route un dispositif en vue d'évaluer les « effets paille », soit de la paille enfouie soit de la paille compostée avec les mêmes quantités mais des formes différentes de N, P, K (PATTERSON, 1960). L'assolement de ces parcelles est de 3 ans avec la rotation orge-betterave à sucre-pomme de terre, les apports de matières organiques ont lieu tous les 2 ans afin de tester leur action immédiate et leurs effets résiduels.

PATTERSON, analysant les résultats de cette expérience, conclut que les différents traitements ne semblent pas avoir d'effet sur les rendements malgré l'amélioration du sol résultant d'une meilleure structure et de l'augmentation de la teneur en matières organiques. Pour cet auteur tous les effets obtenus peuvent être attribués à des variations dans la disponibilité des éléments nutritifs.

Le même problème a été étudié dans le Bassin parisien par DEMOLON et BURGEVIN (1940). Ces auteurs signalaient que les apports de paille étaient susceptibles de compenser les pertes en matière organique d'un sol de limon et évaluaient à 5 tonnes la quantité à enfouir annuellement dans cette région. Ces essais ont été repris par BARBIER et BOISCHOT (1954) dans un sol de limon entre 1949 et 1954.

Les auteurs n'analysent que l'effet paille sur les rendements, l'expérience étant trop récente pour que la paille appliquée puisse augmenter notablement le taux de matière organique du sol.

On constate que les rendements sont variables suivant les années et les cultures. Ces résultats irréguliers peuvent être le fait des conditions de préparation physique du sol au moment des semis, l'enfouissement des pailles pouvant présenter des inconvénients dans les sols de limon. Ils peuvent être dus également à l'importance variable de l'économie de l'azote dans le profil d'une année à l'autre (CHABANNES, 1961). En effet, l'étude de l'influence de doses croissantes d'azote dans des parcelles avec ou sans paille nécessite, pour pouvoir être interprétée convenablement, la connaissance des variations de teneur en azote minéral du sol au cours de l'année ainsi que le rythme d'absorption des nitrates dans les plantes elles-mêmes, dans les parcelles avec ou sans paille.

Compte tenu de cette documentation, l'objet des essais de longue durée entrepris au Jardin d'Essais de Grasse dans les conditions du climat méditerranéen est donc de préciser un certain nombre de points parmi les questions qui viennent d'être examinées.

Le premier point que nous examinerons sera l'influence respective de la fumure minérale et de la fumure organique sur le rendement des cultures maraîchères, l'égalité des apports N-P-K étant réalisée pour l'ensemble des traitements.

Le deuxième point portera sur l'importance des résidus de récolte engendrés par les fumures minérales. En effet, il s'agit de savoir si les fumures minérales appropriées à un site et à une culture sont capables d'engendrer des résidus de récolte en quantité telle que l'apport de matière organique au sol réalisé par leur enfouissement, contribue de façon substantielle au maintien de son état humique. Cette

question amènera à examiner la vitesse de décomposition de la matière organique en sol calcaire méditerranéen en fonction de divers types d'amendements organiques et de fumures minérales.

Enfin, le troisième point concernera les effets à long terme des enfouissements de paille.

Pour préciser ces différents points, nous allons étudier successivement dans la première partie de ce mémoire :

les dispositifs expérimentaux réalisés,
l'action sur les rendements.

L'action sur la matière organique du sol sera l'objet d'étude de la deuxième partie du mémoire.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

A. *Données climatiques au Jardin d'Essais de Grasse*

Le climat de Grasse, de type méditerranéen, est caractérisé par l'absence de pluies estivales, les deux maxima de pluviométrie se situent, l'un en automne : maximum principal représentant 44 p. 100 du total des précipitations annuelles, l'autre au printemps : maximum secondaire, représentant 24 p. 100 du total des précipitations annuelles. Ils se situent l'un et l'autre irrégulièrement dans l'année.

Le coefficient pluviothermique d'EMBERGER (1952) permet de définir, d'une manière plus précise, les caractéristiques du climat à partir de la relation :

$$Q = 100\ P/(M - m)^2$$

où :

P = pluie annuelle en mm.
M = moyenne des maxima du mois le plus chaud.
m = moyenne des minima du mois le plus froid.

Les valeurs de Q pour la région qui nous intéresse sont les suivantes :

	Q	Pluie en mm
Antibes.....	120	878
Grasse.....	104	903
Nice	112	828

Si l'on tient compte, en même temps, de la valeur m, l'ensemble de ces localités ainsi que la plus grande partie des Alpes-Maritimes est caractéristique d'un climat méditerranéen humide. Ces conditions climatiques influent sur la minéralisation de l'azote organique du sol. Nous avons, dans une note antérieure (DROUINEAU et MULLER, 1961) précisé le rythme des variations saisonnières de la teneur en azote minéral de la couche arable sur un dispositif de longue durée. Le maximum d'azote minéral qui s'observe suivant les années entre les mois d'août et d'octobre, dépend des conditions climatiques qui, d'une année à l'autre, sont d'une grande variabilité ainsi que le montre le tableau 2:

B. *Caractéristiques physico-chimiques des sols*

La roche mère est un calcaire dolomitique du Muschelkalk. Les sols calcaires qu'elle supporte ont une texture fine argileuse. Ils ont cependant une perméabilité satisfaisante, grâce à la teneur élevée en graviers et cailloux, et une structure stable, grâce à la teneur importante en calcaire et matière organique.

Les caractéristiques physico-chimiques essentielles de ces sols sont données dans le tableau 3.

TABLEAU 2

Données climatiques au Jardin d'Essais de Grasse (1)

Année	Précipitations (en mm)	Température mensuelle sous abri — Moyenne des maxima du mois le plus chaud (M)	Température mensuelle sous abri — Moyenne des minima du mois le plus froid (*m*)
1948	1 211,1	26,1	1,8
1949	620,0	27,6	3,1
1950	827,5	30,0	2,6
1951	1 021,2	26,9	1,3
1952	1 087,0	30,6	1,1
1953	769,9	28,0	0,7
1954	983,0	23,6	0,3
1955	886,0	28,0	3,2
1956	1 042,7	25,6	3,5
1957	718,0	26,6	1,4
1958	850,0	26,5	2,1
1959	1 072,0	29,3	1,8
1960	1 585,0	27,0	2,7
1961	1 091,0	28,8	1,9

Les températures sont relevées sous abri anglais à 2 m du sol.

Dans ce tableau, nous ne donnons que les caractéristiques générales susceptibles de peu de variations en fonction des traitements. Les teneurs en éléments N, P, K et C qui sont essentiellement variables en fonction des traitements, seront précisées dans la deuxième partie du mémoire.

Sur chaque dispositif, les prélèvements sont effectués tous les 4 ou 5 ans. Les prélèvements de type agronomique sont effectués sur une profondeur de 30 cm. Pour chaque parcelle, l'échantillon est réalisé à partir de 5 points de prélèvements répartis au hasard, homogénéisés et réunis en un échantillon moyen passé au tamis de 2 mm.

TABLEAU 3

Caractères physico-chimiques des sols
(Valeurs moyennes pour l'ensemble des parcelles en 1957)

	Dispositifs n°		
	13	*34*	*50*
Graviers et cailloux	25	30	25
Terre fine	75	70	75
Analyse de la terre fine ‰			
Argile $< 2\mu$	440	450	400
Limon $2 < \mu < 20$	250	230	250
Sables fins $20 < \mu < 50$	100	125	150
Sables moyens $50 < \mu < 200$	60	80	75
Sables grossiers $200 < \mu < 2000$	80	85	65
Calcaire total	246	290	230
Calcaire actif	37	40	22
Capacité d'échange m. e. pour 100 g	30	32	30

(1) Les données climatiques sont comptées pour une campagne agricole du mois d'octobre de l'année « *n* » au mois de septembre de l'année « *n* + 1 ».

Protocoles expérimentaux des dispositifs

Nature des fumures utilisées

Les fumures organiques apportées sur les dispositifs sont à base de fumier de bovins, fumier d'ovins : crottes de bergerie ou « migon » et paille de blé dont la teneur moyenne en éléments fertilisants exprimés en pour cent de matière fraîche est la suivante :

TABLEAU 4

Teneurs en éléments fertilisants des amendements organiques utilisés
(Résultats exprimés en pour cent de matière fraîche)

	Humidité			N total			P_2O_5 total			K_2O total		
	moyen.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.	moy.	max.	min.
Fumiers de bovins	78	84	70	0,54	0,99	0,26	0,40	0,96	0,14	0,55	1,80	0,30
Fumiers d'ovins	60	81	22	1,09	2,50	0,47	0,48	1,00	0,20	1,52	3,20	0,44
Pailles	10	14	8	0,42	0,78	0,24	0,11	0,18	00,7	1,04	1,95	0,36

Les analyses chimiques des fumures organiques effectuées lors de chaque apport font apparaître une très grande variabilité en éléments fertilisants principalement pour les fumiers de bovins et d'ovins.

Les fumiers de bovins sont caractérisés par une teneur identique en N, P, K ; les fumiers d'ovins ont une teneur plus importante en N et en K qu'en P ; les pailles contiennent peu de N et de P, par contre, elles sont très riches en K.

Les fumures minérales utilisées sont essentiellement à base de sulfate d'ammoniaque, d'urée, de superphosphate, de chlorure et de sulfate de potasse.

Dispositifs expérimentaux

Le schéma expérimental adopté pour ces essais est celui des blocs de Fisher. Le nombre de répétitions varie de 5 à 10 suivant les dispositifs et assure une précision satisfaisante. Les parcelles élémentaires ont une surface comprise entre 25 et 40 m².

L'égalité des apports d'azote, d'acide phosphorique et de potasse est réalisée pour chaque dispositif de la façon suivante :

Les amendements organiques utilisés lors de chaque recharge présentant une très grande variabilité dans leur composition chimique, on maintient constante, pour chaque traitement « fumure organique » d'un dispositif, la masse de matières organiques apportées. La fumure exclusivement minérale et les compléments minéraux des parcelles « fumure à la paille » sont alors calculés en fonction de la teneur en N-P-K des fumiers.

Ces dispositifs sont mis en culture à dominante maraîchère mais il n'a pas été possible d'établir un assolement systématique. L'irrigation à la raie est effectuée de façon uniforme sur l'ensemble des parcelles.

L'action directe des fumures organiques et minérales est testée avec des cultures exigeantes : pommes de terre, courgettes, tomates. Les arrière-actions sont testées à l'aide de cultures moins exigeantes : oignons, fèves, pois, haricots, maïs.

Dispositif n° 13.

Les 18 parcelles de ce dispositif (surface parcellaire 25 m²) mis en place depuis 1948 reçoivent tous les 2 ans l'une des fumures suivantes :

1° Paille 20 tonnes/ha
2° Paille 20t/ha + 200 kg d'N minéral.
3° Azote minéral seul 200 kg/ha.

Les recharges en fumures organiques ont lieu tous les deux ans en automne des années paires. La fumure minérale est mise dans la majorité des cas, au printemps de l'année suivant la recharge en paille. Exceptionnellement en 1960 et 1962, l'azote minéral a été reporté en arrière-action.

En 1951, on a effectué une fumure minérale homogène sur l'ensemble du dispositif apportant :

$$N = 128 \text{ kg/ha} \quad P_2O_5 = 96 \text{ kg/ha} \quad K_2O = 176 \text{ kg/ha}$$

L'azote minéral est apporté sous forme de sulfate d'ammoniaque.

Les quantités d'éléments fertilisants apportés pendant la période 1949-1962 correspondent à des apports moyens annuels résumés dans le tableau 5 :

TABLEAU 5

Dispositif nº 13. Apports moyens annuels

Traitements	N de la fumure (kg/ha/an)		P_2O_5 (kg/ha/an)	K_2O (kg/ha/an)
	organique	minérale		
Paille	40	0	23	106
Paille + azote minéral.....	40	100	23	106
Azote minéral ...	0	100	12	23

Dispositif nº 34.

Les 40 parcelles de ce dispositif (surface parcellaire 30 m²) mis en expérimentation depuis 1949 reçoivent depuis 1955 tous les 2 ans, l'une des fumures suivantes :

Fumier de bovins	50 t/ha
Fumier d'ovins	40 t/ha
Paille avec complément minéral	23 t/ha
Fumure minérale	

De 1949 à 1953 inclus, les fumures organiques étaient les suivantes :

Fumier de bovins	57 t/ha
Fumier d'ovins	33 t/ha
Paille avec complément minéral	23 t/ha
Fumure minérale	

Les traitements sont calculés de manière à apporter la même quantité d'éléments fertilisants sur l'ensemble des parcelles. Étant données les teneurs variables en éléments fertilisants des fumiers de bovins et d'ovins, d'une recharge à l'autre, les compléments minéraux des parcelles « paille » et la fumure minérale sont calculés à partir de la teneur moyenne en éléments fertilisants du fumier de bovins et d'ovins utilisés lors de la recharge.

La recharge en fumure organique a lieu tous les 2 ans en automne des années impaires ; les fumures minérales sont mises dans la majorité des cas au printemps de l'année suivant la recharge en matières organiques.

En 1957 exceptionnellement, les compléments minéraux ont été mis en arrière-action.

Les quantités d'éléments fertilisants apportés pendant la période 1950-1962 correspondent à des apports moyens annuels résumés dans le tableau suivant.

TABLEAU 6

Dispositif nº 34. Apports moyens annuels

Traitements	N de la fumure (kg/ha/an)		P_2O_5 (kg/ha/an)	K_2O (kg/ha/an)
	organique	minérale		
Fumier de bovins.	139	0	89	112
Fumier d'ovins ..	192	0	102	296
Paille	56	101	95	204
Fumure minérale .	0	156	95	204

Dispositif nº 50

Les 20 parcelles de ce dispositif (surface parcellaire = 40 mètres carrés) mis en place en 1947 reçoivent tous les 2 ans l'une des fumures suivantes :

Fumier de bovins 31 t/ha
Paille 7,5 t/ha avec complément minéral acide phosphorique et potasse sans azote
Paille 7,5 t/ha avec complément minéral azote, acide phosphorique et potasse
Fumure minérale

La fumure minérale et les compléments minéraux des parcelles « paille » sont calculés de manière à apporter les mêmes quantités d'éléments fertilisants N-P-K que le fumier de bovins, exception faite pour les parcelles « Paille sans azote minéral » qui ne reçoivent pas de complément minéral azoté. La recharge en matières organiques a lieu tous les 2 ans, en automne des années impaires. La fumure minérale est mise, dans la majorité des cas, au printemps de l'année suivant la recharge en matières organiques.

Exceptionnellement en 1961, les compléments minéraux ont été mis en arrière-action avant une culture de tomates.

Les quantités d'éléments fertilisants apportées pendant la période 1948-1961 correspondent à des apports moyens annuels résumés dans le tableau suivant :

TABLEAU 7

Dispositif nº 50. Apports moyens annuels

Traitements	N de la fumure (kg/ha/an)		P_2O_5 (kg/ha/an)	K_2O (kg/ha/an)
	organique	minérale		
Fumier de bovins.	89	0	42	114
Paille sans azote minéral	18,6	6,6	42	114
Paille avec azote minéral	18,6	71	42	114
Fumure minérale .	0	82	42	114

ANALYSE DES RENDEMENTS

A. — Présentation des résultats

D'une année à l'autre, en fonction des actions directes et des arrière-actions, ainsi que des conditions climatiques, la production végétale présente une trop grande variabilité pour que les rendements exprimés en kg/ha puissent être utilement considérés pour une comparaison de l'ensemble des résultats. Dans ces conditions, afin d'obtenir des séries comparatives pour les différentes cultures, nous exprimerons les résultats des récoltes en égalant à 100 les rendements des parcelles « paille » ou « fumier de bovins » suivant les dispositifs.

Pour chaque essai annuel, nous avons effectué la discussion statistique des résultats entre traitements suivant la méthode des blocs de Fisher. On peut, à titre indicatif, calculer une différence significative D à partir de l'expression $D = t\sqrt{\frac{2\ Ve}{nb}}$ (Vessereau, 1960).

Nous n'avons pas effectué d'analyses statistiques englobant, pour chaque dispositif, des essais pluri-annuels, étant donné qu'au départ de l'expérience, il n'était pas prévu de faire entrer chaque dispositif dans une rotation fixe. Dans ces conditions, l'analyse globale est pratiquement impossible et il ne peut être évidemment question de faire entrer dans la même analyse des cultures différentes, par suite des résidus et des interactions variant d'une culture à l'autre.

Nous examinerons, pour chaque dispositif, les rendements en fonction des actions directes et des arrière-actions des fumures organiques.

Dispositif n° *13*

Action directe.

Pour la période comprise entre 1949 et 1955, l'azote minéral complémentaire apporté en action directe, présente un effet plus marqué sur les rendements en présence de paille. Sur 7 années d'observations, le traitement « paille + azote minéral » s'est montré pour 6 d'entre elles, supérieur aux deux autres traitements. Cependant les différences entre le traitement « paille + azote minéral » et le traitement « azote minéral » restent à la limite de signification des résultats. Pour la période comprise entre 1959 et 1961, l'azote minéral est différé en arrière-action ; il n'y a pratiquement plus de différence dans les rendements entre les traitements en action directe des fumures organiques.

Arrière-action

Les rendements des traitements paille avec ou sans azote minéral sont les plus élevés. Il faut noter là encore que pendant les 6 années d'observation, en arrière-action des fumures organiques, le traitement « paille + azote minéral » s'est montré significativement supérieur aux 2 autres traitements.

L'ensemble de ces résultats est donné dans les tableaux 8 et 9.

TABLEAU 8

Dispositif n° 13. — Action directe des fumures organiques
(Rendement des parcelles « Paille » = 100)

Années	Culture	Paille	Paille + N minéral	Azote minéral	Signification au seuil de P = 0,01
1949	Pommes de terre	100	180	160	10
1951	Pois	100	103	95	Non significatif
1951	Betteraves rouges	100	99	97	Non significatif
1953	Pommes de terre	100	205	186	24
1955	Oignons de Mulhouse	100	128	118	30
1957	Pois	100	117	108	Non significatif
1959 (*)	Carottes	100	116	100	Non significatif
1961 (*)	Pommes de terre	100	100	86	Non significatif

(*) Compléments minéraux reportés en arrière-action des fumures organiques.

TABLEAU 9

Dispositif n° 13. — Arrière-actions des fumures organiques
(Rendement des parcelles « Paille » = 100)

Année	Culture	Paille	Paille + N minéral	Azote minéral	Signification au seuil de P = 0,01
1952	Courgettes	100	73	32	47
1954	Pois	100	92	87	Non significatif
1956	Pommes de terre	100	87	69	17
1956	Maïs	100	102	85	8
1958	Pommes de terre	100	103	77	9
1960 (*)	Oignons de Mulhouse	100	220	194	14
1962 (*)	Haricots	100	115	79	Non significatif

(*) Compléments minéraux mis en arrière-action de fumures organiques.

Dispositif n° 34

Action directe.

Sur ce dispositif, si l'on examine le classement des traitements année par année, pour la période comprise entre 1950 et 1962, on constate qu'ils se rangent toujours dans le même ordre. Les traitements « fumier de bovins » et « fumier d'ovins »

se comportent de manière absolument identique et donnent des rendements de 50 à 100 p. 100 inférieurs aux rendements du traitement « fumure minérale », exception faite pour l'année 1954 où les rendements des parcelles du traitement « fumure minérale » se sont trouvés réduits par suite du report en arrière-action de la quantité d'azote minéral correspondant à la quantité d'azote apporté par la paille et pour l'année 1956 où les compléments minéraux ont été reportés en totalité en arrière-action.

Par rapport au traitement « fumure minérale » sur les 7 années d'observation, 5 d'entre elles ont montré une supériorité du traitement « paille » donnant des excédents de récolte allant de 19 à 24 p. 100, sauf pour les cultures de pommes de terre en 1952 et de courgettes en 1962 où les deux traitements arrivent à égalité.

Arrière-action.

Les traitements à base de fumures organiques : fumiers de bovins, d'ovins et paille sont sensiblement à égalité. Par rapport à la fumure minérale, le traitement « paille » ne présente de rendements significativement supérieurs que pour 3 sur 7 années d'observation. Le traitement « fumure minérale » donne toujours les rendements les plus faibles pour l'ensemble des observations comprises entre 1951 et 1963, à l'exception de l'année 1955 où, dans le cas d'une culture de pommes de terre, le rendement des parcelles « fumure minérale » est le plus élevé par suite de la mise en arrière-action d'une partie du complément minéral azoté ainsi qu'il a été dit dans le paragraphe précédent. Par contre, le traitement « paille » est celui qui donne le rendement le plus faible. En 1957 également, sur une culture de pomme de terre où les compléments minéraux des parcelles « paille » et « minérale » ont été mis en arrière-action, ces deux traitements assurent pratiquement à égalité, des rendements supérieurs de 100 p. 100 par rapport aux rendements des fumures exclusivement organiques.

L'ensemble de ces résultats est donné dans les tableaux 10 et 11.

TABLEAU 10

Dispositif n° 34. — Action directe des fumures organiques
(Rendement des parcelles « Fumier bovins » = 100)

Année	Culture	Fumier de bovins	Fumier d'ovins	Paille	Fumure minérale	Signification au seuil de P = 0,01
1950	Pommes de terre	100	94	161	135	12
1952	Pommes de terre	100	94	159	160	9
1954 (*)	Oignons de Mulhouse	100	95	117	91	8
1956 (*)	Courgettes	100	104	74	54	17
1958	Oignons de Mulhouse	100	110	141	112	14
1960	Pommes de terre	100	94	184	152	14
1962	Courgettes	100	112	212	212	46

(*) Compléments minéraux reportés en arrière-action des fumures organiques.

TABLEAU II

Dispositif n° 34. — Arrière-action des fumures organiques
(Rendement des parcelles « Fumier de bovins » = 100)

Année	Culture	Fumier de bovins	Fumier d'ovins	Paille	Fumure minérale	Signification au seuil de P = 0,01
1951	Courgettes	100	105	116	77	12
1953	Pommes de terre	100	107	103	75	11
1955 (*)	Pommes de terre	100	97	85	114	8
1957 (*)	Pommes de terre	100	107	216	207	29
1959	Pois	100	104	96	87	10
1961	Maïs	100	105	102	96	Non significatif
1963	Pois	100	102	103	98	Non significatif

(*) Complément minéraux mis en arrière-action des fumures organique.

Dispositif n° 50

Action directe

En action directe des fumures organiques et minérales sur ce dispositif, deux groupes de traitements se détachent : les traitements « fumier de bovin » et les traitements « Paille avec P + K sans N » d'une part, et d'autre part, les traitements « Paille avec P + K + N » et « fumure minérale », exception faite pour l'année 1960 où les compléments minéraux des traitements « paille » ont été reportés en arrière-action.

Les premiers donnent toujours les rendements les plus faibles ; pour 4 seulement des 10 cultures effectuées sur ce dispositif, le traitement « Paille avec P + K sans N » s'est montré significativement inférieur au traitement fumier de bovins.

Les secondes donnent toujours les rendements les plus élevés ; si on analyse plus en détail ces résultats, on constate que seulement pour 1 des 10 cultures effectuées (pommes de terre en 1948) le traitement « Paille avec P + K + N » s'est montré supérieur au traitement « fumure minérale ». Dans ces conditions, il est difficile de mettre en évidence la supériorité d'un traitement par rapport à l'autre, dans ce second groupe.

Arrière-action

En arrière-action, pour la période comprise entre 1951 et 1963, les fumures à base de fumier maintiennent les rendements les plus élevés. Les fumures à la paille avec ou sans azote se situent à un niveau plus faible. Les parcelles minérales voient leurs rendements diminuer considérablement. Le traitement « paille avec azote » donne des rendements significativement supérieurs aux rendements du traitement « fumure minérale » uniquement en 1953 et 1955. Une exception doit être faite pour l'année 1961 où les compléments minéraux ont été mis en arrière-action, avant la culture de tomate. Dans ce cas, les traitements « Paille avec P + K + N » et « fumure

minérale » assurent les rendements les plus élevés, alors que le traitement « Paille avec P + K sans N » est celui qui donne les rendements les plus faibles.

L'ensemble de ces résultats est donné dans les tableaux 12 et 13.

TABLEAU 12

Dispositif nº 50. — Action directe des fumures organiques
(Rendement des parcelles « Fumier » = 100)

Année	Culture	Fumier de bovins	Paille avec P + K sans N	Paille avec P +K +N	Fumure minérale	Signification au seuil de P = 0,01
1948	Pommes de terre	100	130	151	115	34
1950	Pois	100	90	86	99	Non significatif
1952	Oignons de Mulhouse	100	87	151	171	18
1954	Pommes de terre	100	63	154	168	23
1956	Pommes de terre	100	78	165	185	27
	Courgettes	100	60	75	76	20
1958	Pommes de terre	100	82	154	151	19
1960*	Fèves	100	73	81	80	19
	Maïs	100	81	83	78	14
1962	Pommes de terre	100	82	204	224	25

* Compléments minéraux reportés en arrière-action des fumures organiques.

TABLEAU 13

Dispositif nº 50. — Arrière-action des fumures organiques
(Rendement des parcelles « Fumier » = 100)

Année	Culture	Fumier de bovins	Paille sans azote avec P + K	Paille avec azote et P + K	Fumure minérale	Signification au seuil de P = 0,01
1951	Pommes de terre	100	87	85	74	32
1953	Courgettes	100	84	83	57	18
1955	Oignons de Mulhouse	100	91	93	83	11
1957	Oignons de Mulhouse	100	93	94	91	Non significatif
1959	Courgettes	100	115	105	99	Non significatif
1961*	Pois	100	100	99	92	Non significatif
	Tomates	100	81	113	121	30
1963	Haricots	100	93	84	67	19

* Compléments minéraux mis en arrière-action.

B. — Discussion des résultats

Bien que les données obtenues jusqu'à présent au Jardin d'Essais de Grasse ne portent pas sur un nombre suffisant d'années pour dégager des conclusions définitives (une première analyse de ces résultats a été faite par Gouny en 1956), nous essayerons de dégager, en comparant nos résultats avec ceux obtenus par d'autres auteurs, quelques conclusions des faits exposés ci-dessus.

Il est bien évident que, si les effets résiduels obtenus avec les fumures exclusivement organiques sont beaucoup plus marqués que ceux obtenus avec les fumures minérales, il est permis d'affirmer que la fumure organique considérée comme source exclusive de N-P-K est une très mauvaise solution au problème de la fertilisation.

Si l'emploi exclusif d'engrais minéraux à un même niveau de fourniture N-P-K que celui des fumures organiques permet en action directe d'obtenir un niveau de production beaucoup plus élevé que celui obtenu avec des fumures exclusivement organiques, le fait essentiel est que sur les parcelles ne recevant que des engrais minéraux, il n'est pas possible de voir pendant la période envisagée : 1948 à 1962, de diminution de rendement, ainsi que le montre le tableau ci-dessus où nous avons regroupé les rendements en kg/are de pommes de terre sur les dispositifs n° 34 et 50.

Les variations de rendement observées sont davantage imputables aux variations climatiques ou variétales qu'aux variations de fertilité :

Dispositif n° 34

Année	1950	1952	1960	1964
Variété	*Esterlingen*	*BF-15*	*Bea*	*Bintje*
Classe	B	A	A	A
Rendement en kg/are	189	238	161	260

Dispositif n° 50

Année	1948	1954	1956	1958	1962
Variété	*Bintje*	*Bintje*	*Sirtema*	*Bintje*	*Bintje*
Classe	A	A	A	A	A
Rendement en kg/are	222	285	97,2	144	375

La durée de ces essais ne permet pas de noter une diminution de rendement sur les parcelles à fumure uniquement minérale car, si cette baisse de rendement devait se produire, elle ne pourrait, d'après Barbier (1953), devenir sensible qu'au bout de 25 ans au minimum.

L'analyse des effets « paille » est beaucoup plus délicate. En toute rigueur, si l'on veut étudier l'interaction d'une fumure organique et d'engrais minéraux, il faut étudier une famille de courbes traduisant l'action de doses croissantes d'engrais minéraux en présence ou en l'absence de la fumure organique.

Dans le cas présent, les doses d'azote employées, comprises entre 80 et 150 kg d'azote par hectare et par an semblent suffisantes pour que n'interviennent pas des

facteurs limitant la nutrition minérale. Il est donc légitime de voir dans quelles conditions la paille a pu exercer une action spécifique sur les rendements, c'est-à-dire une action qui ne peut pas être obtenue par les engrais minéraux employés seuls.

Des essais identiques à ceux étudiés ici quant aux enfouissements de paille, ont été effectués à Rothamsted (PATTERSON, 1960). Cette expérience de longue durée montre qu'il n'y a pas d'augmentation dans la fertilité du sol par addition de paille à la dose de 6,8 t/ha et que tous les effets obtenus peuvent être attribués à des modifications dans la disponibilité des éléments assimilables : apports d'azote et de potasse provenant de la décomposition de la paille.

Nos essais peuvent apporter quelques précisions supplémentaires quant à l'action de la paille sur les rendements d'une part et sur l'évolution du niveau matière organique du sol d'autre part, ainsi que nous le verrons dans la deuxième partie de ce mémoire.

Si l'on examine le comportement respectif des traitements fumure minérale et fumure à la paille en fonction des doses d'azote total apportées sur les dispositifs, on constate que :

— Sur le dispositif 50 où les apports d'azote fumure organique + minérale des traitements « paille » et « minérale » représentent respectivement 180 et 164 unités d'azote pour une période de 2 ans, il n'est pas possible de voir d'effets favorables du traitement « Paille », tant en action directe qu'en arrière-action. En effet, en action directe des fumures organiques pour une seule des 10 cultures, le traitement paille a été supérieur au traitement minéral. De même en arrière-action, 2 sur 8 des cultures effectuées ont donné des rendements des parcelles paille supérieurs aux rendements des parcelles minérales.

— Sur le dispositif 13 où les apports d'azote des traitements représentent respectivement sur les parcelles « Paille avec azote » et « Azote minéral » 280 et 200 unités pour une période de 2 ans, nous avons noté la supériorité du traitement « Paille avec azote » par rapport au traitement « azote minéral » uniquement en arrière-action, pour 4 années sur 6.

— Sur le dispositif 34 où les apports d'azote des traitements « paille » et « minéral » représentent respectivement 314 et 312 unités d'azote pour une période de 2 ans, nous avons noté pour 7 années d'observation en action directe, 5 pour lesquelles le traitement paille était supérieur au traitement minéral. En arrière-action, la supériorité de la fumure à la paille, par rapport à la fumure minérale est moins nette car elle ne s'est montrée supérieure que pour 3 années sur 7.

Pour des niveaux moyens de fertilisation azotée, la paille ne procure donc pas de supplément de récolte. Par contre, pour des niveaux élevés, la paille procure des suppléments de récolte appréciables.

On peut interpréter ces résultats dans le cadre des hypothèses proposées par BARBIER et BOISCHOT (1954).

L'« équivalent azote » (quantité « b » de MITSHERLISH) est plus grand en présence de paille qu'en son absence mais le « coefficient d'action » de l'azote (quantité « c » de MITSHERLISH) doit être plus petit. Il en résulte que la courbe de rendement doit être plus tendue, à égalité de rendement, en présence de paille qu'en son absence.

D'autre part, les doses importantes d'azote sont moins nuisibles en présence de matières organiques ; donc la courbe de rendement de l'azote en présence de paille, si elle monte d'abord moins vite, doit monter plus haut.

On peut alors concevoir le schéma suivant :

Pour de faibles niveaux de fertilisation azotée, les rendements seront déprimés par rapport à la fumure minérale (dispositifs 13 et 50, paille sans azote).

Pour des niveaux moyens de fertilisation azotée, il n'y aura pas de différence sensible entre le traitement paille et le traitement minéral (dispositif 50).

Pour des niveaux élevés de fertilisation azotée, il y aura une nette augmentation des rendements sur les parcelles paille par rapport aux parcelles azote minéral uniquement (dispositifs 13 et surtout 34).

ACTION SUR LA QUALITÉ DES RÉCOLTES

L'influence éventuelle de la fertilisation des sols sur la teneur des végétaux alimentaires en acide ascorbique a été étudiée par Mlle SCHOLLER et coll. (1959) sur un des dispositifs du Jardin d'Essais, pour une culture de pommes de terre. Ces auteurs notent l'absence de variation significative du taux de vitamine C dans le tubercule quelle que soit la nature des fertilisants apportés au sol et ceci malgré des variations importantes de rendement.

CONCLUSIONS

Les essais de fertilisation de longue durée entrepris au Jardin d'Essais de Grasse, avec un rythme biennal d'apport de matière organique, nous ont permis de comparer les effets à long terme des fumiers, de la paille enfouie avec et sans compléments minéraux et des fumures minérales à égalité de N, P, K pour des niveaux variés de fertilisation.

Les résultats obtenus sont restés dans le même sens pendant toute la durée des essais. Bien qu'ils confirment ceux de très nombreux expérimentateurs, ils sont à retenir en raison de l'intensité des fumures.

Sur l'ensemble des essais, les effets résiduels des fumures organiques ont été beaucoup plus marqués que ceux obtenus avec les fumures minérales. Les effets résiduels de la paille sont très importants puisqu'à la dose de 23 t/ha ils sont équivalents à ceux du fumier de bovins à la dose de 50 t/ha, sur le dispositif 34.

L'emploi des engrais minéraux à un même niveau de fourniture N-P-K que celui des fumures organiques, permet, en action directe, d'obtenir des rendements toujours plus élevés que ceux obtenus avec les fumures exclusivement organiques, sans pouvoir déceler, entre 1948 et 1962, de diminution de rendement.

Dans le cas de la fumure à la paille où l'on procède à une fumure organique avec compléments minéraux, les augmentations de rendement du traitement « paille » par rapport au traitement « minéral » ne deviennent appréciables que pour des niveaux élevés de fertilisation minérale azotée, supérieurs à 200 kg N/ha pour une période de 2 ans et pour des apports importants de paille enfouie supérieurs à 20 t/ha pour cette même période.

Il résulte de ces essais qu'en présence de paille utilisée dans les conditions qui

viennent d'être indiquées, les rendements obtenus ont été supérieurs à ceux obtenus avec une fumure exclusivement minérale.

On peut se demander, si l'effet spécifique obtenu avec la fumure à la paille sur la fertilité c'est-à-dire l'action qui ne peut être obtenue par des engrais minéraux employés seuls dans les conditions classiques de la grande culture, ne doit pas être rapporté en partie à des modifications de la structure et surtout à des modifications d'ordre chimique : modification dans la disponibilité des éléments assimilables du sol.

En effet, bien que les divers traitements d'un même dispositif soient calculés à égalité d'apport de N, P, K, il existe une différence fondamentale dans la fourniture des éléments minéraux à partir de la fraction organique de la fumure qui libère progressivement au cours de sa minéralisation les éléments minéraux qu'elle renferme, et à partir de la fraction minérale qui est fournie à dose massive en une seule fois, avant le semis ou la plantation.

Pour être interprétée correctement, l'étude de l'influence de la fumure organique sur la fertilité, nécessite donc la connaissance des variations de la teneur en éléments assimilables du sol au cours de l'année ainsi que le rythme d'absorption des éléments minéraux dans les plantes elles-mêmes sur les parcelles avec ou sans fumure organique.

Reçu pour publication en mai 1965.

SUMMARY

OBSERVATIONS ON THE LONG-TERME EFFECTS OF ORGANIC MANURING AND MINERAL FERTILIZING UNDER A MEDITERRANEAN CLIMATE. I. EFFECTS ON YIELD

Long-term fertilizer trials conducted in the experimental garden at Grasse, comprising organic-matter applications every two years, permitted comparison of the long-term effects of farmyard manure, straw incorporated without or with mineral additions, and mineral fertilizers at equal amounts of N, P and K for the various rates of fertilizers applied.

The experimental design is described and the effect of different treatments on yields are discussed.

On the whole, the residual action of organic manures was much more marked than that of mineral fertilizers. The residual action of straw was rather high.

Mineral fertilizers applied at the some rates of N, P and K as those supplied with organic manures always produced higher yields than organic manures alone did, without any sign of a decrease in yields from 1948 to 1962.

With straw, when applied in conjunction with additional mineral supplements, yield increases obtained in comparison with mineral treatment were high only with heavy applications of more than 200 kg/ha mineral nitrogen during a period of two years, or with incorporation of straw at the high rate of more than 20 t/ha during the same period.

ZUSAMMENFASSUNG

BEOBACHTUNGEN AUF LANGE SICHT ÜBER DIE WIRKUNGEN DER ORGANISCHEN UND MINERALISCHEN DÜNGUNG UNTER MITTELMEERKLIMA

Durch Düngungsversuche auf lange Sicht, die im Versuchsgarten von Grasse unternommen wurden, mit organischem Dünger alle zwei Jahre, konnten die Wirkungen des Stallmistes, des untergefahrenen Strohs mit oder ohne Mineraldünger und verschiedene N-, P- und K-Gaben, verglichen werden.

Im ersten Teil der Arbeit erfolgt die Beschreibung der Versuchsanordnung, und die Untersuchung der Wirkung dieser Versuche auf den Ertrag.

Im ganzen gesehen waren die Resteffekte der organischen Düngung viel ausgeprägter als jene mit Mineraldünger. Die Resteffekte des Strohes sind sehr wichtig.

Bei Anwendung der Mineraldünger auf gleicher NPK-Stufe wie die organische Düngung erhält man jedesmal höhere Erträge als mit ausschliesslich organischer Düngung, ohne dass man zwichen 1948 und 1962 einen Ertragsabfall feststellt.

Im Falle von Strohdüngung mit Beigabe von Mineraldünger werden die Ertragssteigerungen gegenüber Mineraldüngung nur bei hohen Stickstoffgaben, d.h.mehr als 200 kg/ha für eine zweijährige Dauer, und für grosse Strohmengen, 20 t/ha übersteigend, ebenfalls für zwei Jahre, wirklich fühlbar.

НАБЛЮДЕНИЯ НАД ДОЛГОВРЕМЕННЫМИ ЭФФЕКТАМИ ОРГАНИЧЕСКИХ И МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В СРЕДИЗЕМНОМОРСКОМ КЛИМАТЕ.

I. *Действие на урожайность.*

Ж. Мюллер.

РЕЗЮМЕ

Опыты с удобрениями долгосрочного действия, проведенные в Опытном Саду в Грассе, при двухгодичном цикле внесения органических веществ, позволили сравнить длительные эффекты навожения, запаханной соломы с одновременным внесением минеральных подкормок и без них, и минерального питания, с равным для различных уровней удобрения почвы, количеством внесенных N, P и K.

В первой части данной работы описываются диспозиции эксперимента и обсуждается действие различных типов удобрений на урожайность.

Во всех опытах после-действие органических удобрений было более ярко выраженным чем остаточное действие минеральных удобрений. Последействие соломы — особенно сильно.

Применение минеральных удобрений с тем-же уровнем внесения N, P и K что и в удобрениях органических, позволило получить, при помощи прямого действия, всегда более крупные урожаи, чем те, которые получались с помощью удобрений исключительно органических, при чем, между 1948 и 1962 не было обнаружено никакого уменьшения общей урожайности.

В случаях удобрения соломой с прибавлением минеральных подкормок, увеличение урожайности от приноса соломы по отношению к увеличению вызванному минеральными подкормками, становится ощутимым только в тех случаях, когда уровень внесения минерального азота превышает 200 кг/га за два года, а количество запаханной соломы равно не меньше чем 20 тонн/га за тот-же период.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLISON F. E., 1955. — Does nitrogen applied to crop residues produce more humus? *Soil Sci. amer. Proc.*, **19**, 2, 219-221.

BARBIER G., 1943. Le problème de l'humus dans les exploitations ayant abandonné l'élevage. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **29**, 526-529.

BARBIER G., BOISCHOT P., 1954. Cinq années d'expérience sur la fumure à la paille. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **40**, 43-49.

BAWDEN F. C., 1962. *Guide to the experimental Farms*, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, Herts.

BISHOP R. F., ATKINSON H. J., 1954. Changes in organic matter and certain other soil constituents in forty years of cropping under irrigation. *Canad. J. agric. Sci.*, **34**, 2, 177-180.

BOHNE H., GARVERT J., 1951. Recherches sur l'importance des résidus de récoltes de céréales pour la fourniture d'humus. *Z. Pflanz.*, **55**, 2, 170-178.

BRAGE B. L., THOMSON M. J., COLDWELL A. C., 1952. Long time effect of applying barnyard manure at varied rates on crop yield and some chemical constituents of the soil. *Agron.* , **44**, 17-20.

CHABANNES J., 1961. Arrières effets cumulés de fumures azotées minérales sur le cycle annuel de l'azote minéral du sol. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **47**, 935-939.

COPE J. T., STURKIE D. G., HILTBOLD A. E., 1958. Effects of manure vetch and commercial nitrogen on crop yield and carbon and nitrogen content of a fine sandy and over a 30 years period. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **22**, 524-527.

DEMOLON A., BURGEVIN G., 1940. Sur l'enfouissement direct des pailles de céréales dans le sol et ses répercussions. *Ann. agron.*, **10**, 357-365.

DODGE D., JONES H., 1948. The effects of long time fertility treatments on the nitrogen and carbon content of a Prairie soil. *J. amer. Soc. Agron.*, **40**, 778-785.

DROUINEAU G., MULLER J., 1961. Dix ans d'étude sur l'évolution de l'azote minéral dans un sol du midi de la France. *Agrochimica*, **5**, 272-279.

DROUINEAU G., 1963. Fumures minérales et fumures organiques. Cas des exploitations sans bétail. *Bull. Ass. Fr. Étude du Sol*, **2**, 85-107.

EMBERGER L., 1952. Sur le quotient pluviothermique. *C. R. Acad. Sci.*, **234**, 2508-2510.

FROEHLICH H., 1956. Die Bodendurchwur seitens verschiedener gemüsearten. Arch. Gartenb., **4**, 5, 389-417.

GERICKE S., 1943. Les résidus de cultures et la teneur du sol en humus. *Chem. Ztg.*, **67**, 277-278.

GOUNY P., 1956. Contribution aux études de fertilisation en sol calcaire sous climat méditerranéen. *6e Congr. Intern. Sci. Sol*, Paris, IV, 285-289.

GUÉRILLOT J., 1944. Les réserves des sols et leur épuisement. *Fertilisants*, **1**, 1-5.

HOLTZ H. F., VAN DECAVEYE F. I., 1938. Organic residues and nitrogen fertilizers in relation to the productivity and humus content of pelouse silt loam. *Soil Sci.*, **45**, 143-163.

IVERSEN N. R., 1953. Danische versuche mit stalldunger und mineralischem dunger der versuchstation Askov 1894-1948. *Ernähr. Pfl.*, 26-48.

MCLEOD L. B. et *al.*, 1960. A long terme field experiment with commercial fertilizers and manure : II. Fertility levels and crop yields in a rotation of swedes, oats and hay. *Canad. J. Soil Sci.*, **40**, 136-451.

MERKER J., 1956. Untersuchungen an den Ernten und der Böden des Versuches. Ewiger Roggenbau « in Halle » Saale. *Kuhn Arch.*, **69-70**, 153-215.

PATTERSON H. D., 1960. An experiment on the effects of straw ploughed in or composted on a three course rotation of crops. *J. agric. Sci.*, **54**, 222-229.

PEEVY W. J., SMITH F. B., BROWN P. E., 1940. Effects of rotational and manurial treatments for twenty years on the organic matter, nitrogen and phosphorus content of clarion and webster soils. *J. amer. Soc. Agric.*, **32**, 739-753.

PRATT P. F., GOULBEN B., HARDING R. B., 1957. Changes in organic carbon and nitrogen in a irrigated soil during 28 years of differential fertilisation. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **21**, 215-219.

PRATT P. F., HARDING R. B., JONES W. W., CHAPMAN H. D., 1959. Chemical change in a irrigated soil during 28 years of differential fertilization. *Hilgardia*, **28**, 381-420.

ROYER A. F., BERTRAMSON B. R., MULVEY R. R., 1948. Soil fertility levels as influenced by long time differential fertilization practice. *J. amer. Soc. Agric.*, **40**, 685-693.

RUSSEL J., WOELCKER J. A., 1936. *50 years of field experiments at the Woburn Experimental Station.* Long Man Green Co.

SCHOLLER C. et *al.*, 1959. Teneur en acide ascorbique de tubercules de pommes de terre récoltés sur des parcelles ayant reçu divers traitements de fertilisation. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, **45**, 533-536.

VESSEREAU A., 1960. *Méthodes statistiques en biologie et en agronomie.* Baillière et Fils, Ed., Paris.

WISSELINK G. J., 1961. *Een vijftienjarige proef met stalmest en stoppelgewassen op humeuze zandgrond te Heino.* Institut woor bodemvruchtbaaeheid, Groningen.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction,* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise. tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion* ; f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés. et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant diposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5. *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. CHAMINADE, Centre national de Recherches agronomiques Versailles (Seine-et-Oise), France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 12-1965.

Dépôt légal : 4e trimestre. 1965 *N° d'impression : 111.*

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 4

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique, à l'exception des sommaires et résumés.

Ann. agron., 1965, **16** (4), 327-400.

ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DES SOLS (1)

PREMIÈRE PARTIE. (2)

G. MONNIER

Laboratoire des sols,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine et Oise)

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE DES MODES D'ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DU SOL.

INTRODUCTION

CHAPITRE PREMIER : LES MÉTHODES D'ÉTUDE.

A. Appréciation de la stabilité structurale.
B. Caractérisation des matières organiques.

1. Fractionnement densimétrique.
2. Dosage du carbone organique.
3. Dosage de l'azote organique.

C. Caractérisation du support minéral.

CHAPITRE II : ÉTUDE DE LA COHÉSION ET DE LA MOUILLABILITÉ DU SOL.

1. Définition et mesure de la cohésion.
2. Définition et mesure de la mouillabilité.

(1) Thèse soutenue le 20 mars 1965 à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, pour obtenir le titre de Docteur-Ingénieur.
(2) La deuxième partie sera publiée dans le numéro 5/1965 des Annales agronomiques.

CHAPITRE III : ÉTUDE DES « ÉCHANTILLONS MODÈLES ».

1. Préparation des échantillons.
2. Résultats et discussion.

CHAPITRE IV : PHÉNOMÈNES DE FERMENTATION.

A. Action des agents de la fermentation.

1. Description de l'expérience.
2. Résultats.
3. Relations entre les variations de stabilité et le développement des micro-organismes

B. Stabilisation due à la fermentation de produits végétaux.

1. Essai « Durée de fermentation de la luzerne ».
2. Essais de fermentations en tubes.

CHAPITRE V : MODIFICATION EXPÉRIMENTALE DE STABILITÉ.

A. Action du chauffage.

1. Chauffage au laboratoire.
2. Action des feux en plein champ.

B. Modification de stabilité par fermentation.

CHAPITRE VI : INFLUENCE DE DIFFÉRENTS CATIONS ASSOCIÉS A LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE.

CHAPITRE VII : RELATIONS ENTRE LA NATURE DU SUPPORT MINÉRAL ET L'EFFICACITÉ DES MATIÈRES ORGANIQUES.

CONCLUSION DE LA PREMIÈRE PARTIE.

DEUXIÈME PARTIE [1]

INTRODUCTION

CHAPITRE PREMIER : ÉTAT ET ÉVOLUTION DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LE SOL.

CHAPITRE II : LES RÉSIDUS DE RÉCOLTE.

— Bilan organique et structural des rotations sans fumure organique.
— Cas particulier de l'enfouissement des pailles.

CHAPITRE III : LES FUMIERS ET AUTRES PRODUITS ORGANIQUES FERMENTÉS ET SEMI-FERMENTÉS.

1. Les fumiers.
2. Engrais organiques divers.

CHAPITRE IV : LES ENGRAIS VERTS.

1. Les différents types d'engrais verts.
2. Les différents modes d'action des engrais verts sur la structure du sol et sa stabilité.

[1] Cette deuxième partie paraîtra dans le numéro 5/1965 des Annales agronomiques.

CHAPITRE V : REPOS DU SOL SOUS VÉGÉTATION PERMANENTE.

A. Évolution du sol consécutive à des défrichements.

B. Influence du repos sous prairie sur les propriétés physiques du sol.

1. Mécanisme de l'amélioration structurale.
   — Enrichissement du sol en matière organique.
   — Amélioration de la structure et de sa stabilité.
2. Moyens de contrôle de la répartition des racines et de l'amélioration structurale.
   — Choix botanique : influence de l'espèce.
   — Influence du mode d'exploitation de la prairie.
   — Influence des conditions d'installation de la prairie.
   — Relations entre la durée de la prairie et la stabilisation de la structure.
3. Évolution du sol après retournement de la prairie.
   — Cas des prairies à racines annuelles.
   — Cas des prairies à racines perennes.
   — Relations entre l'âge de la prairie et la durée de son action stabilisante.
4. Retournement de la prairie.

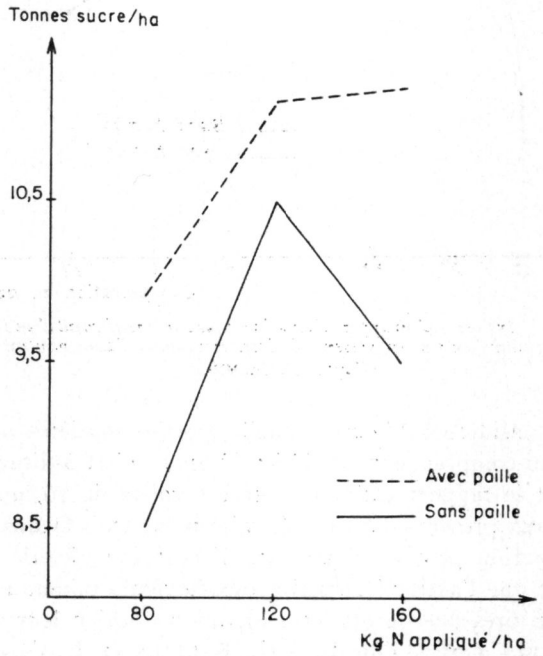
CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

SOMMAIRE

Après une description des méthodes utilisées, cette première partie du mémoire traite de l'étude expérimentale au laboratoire de l'action des matières organiques sur la stabilité structurale du sol. Cette étude est abordée par l'examen du comportement d'échantillons modèles enrichis en substances organiques définies. A partir de ces références, sont étudiées les modalités de stabilisation par des matières organiques plus complexes au cours de leur évolution par fermentation dans le sol.

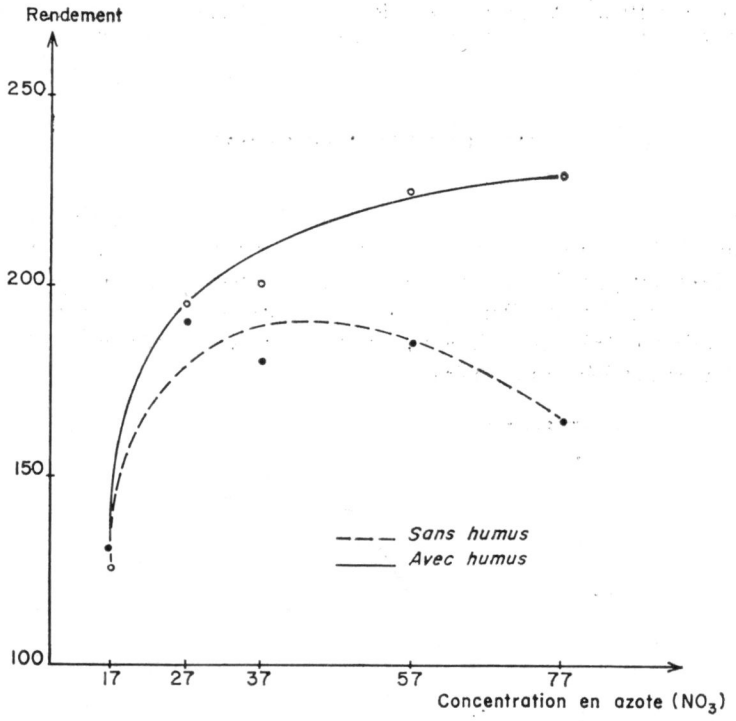
INTRODUCTION GÉNÉRALE

Traditionnellement l'humus a été considéré comme le facteur essentiel de la fertilité du sol. A la fin du XVIIIe siècle, on estimait même que l'alimentation des végétaux s'effectuait par absorption directe des matières organiques noires renfermées dans le sol ; c'est-à-dire de l'humus. C'est à Liebig que revient, comme on le sait, le mérite d'avoir montré que l'alimentation des végétaux supérieurs s'effectuait uniquement à partir d'éléments minéraux.



GRAPHIQUE 1. — *Influence d'une fumure organique sur le rendement en plein champ de la betterave à sucre recevant des doses croissantes d'azote minéral*
(d'après G. BARBIER)

Corollairement, les matières organiques semblaient n'avoir plus d'autre intérêt que les éléments minéraux qu'elles contenaient. Après une controverse passionnée opposant des faits expérimentaux apparemment incontestables, une doctrine attribuant différents rôles aux matières organiques du sol a fini par s'élaborer ; on y trouve une justification des réserves formulées, à la suite des travaux de Liebig, par d'anciens agronomes comme Boussingault qui disait : « Il faut reconnaître que nous sommes maladroits de nous donner tant de mal pour apporter le fumier par tombereaux dans nos champs ; si cet engrais n'agissait que par ses éléments minéraux, il suffirait de l'incinérer et l'on pourrait en transporter la matière utile avec une brouette. »



GRAPHIQUE 2. — *Influence d'un apport d'acide humique sur le rendement d'un Ray-grass d'Italie cultivé en pots en présence de doses croissantes d'azote minéral*
(d'après R. CHAMINADE)

En fait, on considère à l'heure actuelle que les matières organiques au sens large du terme, qui comprennent aussi bien l'humus, c'est-à-dire un groupe de substances noires dont le rapport carbone/azote est voisin de 10, que tous les résidus végétaux et animaux présents dans le sol, agissent de trois façons différentes :

— Par une action physiologique dans l'acception globale du terme, qui se traduit par le fait que l'activité nutritive des éléments minéraux présente un plafond plus élevé en présence de matières organiques qu'en leur absence. Les deux diagrammes suivants 1 et 2, l'un dû à G. BARBIER et J. CHABANNES (1961) et l'autre à R. CHAMINADE (1958) montrent l'allure du phénomène et précisent qu'il n'est pas spécifique d'une forme de matière organique puisque l'une des courbes a

été obtenue à partir d'apports de paille fraîche et l'autre à l'aide d'acides humiques extraits de tourbe.

— Par ailleurs les matières organiques ont un ensemble de fonctions influant sur les propriétés physiques du sol. A des taux relativement élevés, elles peuvent augmenter sa capacité pour l'eau. Elles ont également une action sur la structure du sol par un effet de division lié surtout à la présence de racines mais assuré dans une certaine mesure par tous les résidus organiques.

— Enfin, les matières, organiques ont une influence d'une grande importance sur la stabilité de cette structure. En leur présence, les petits fragments de terre qui sont le résultat de l'action combinée du travail du sol et d'agents naturels tels que le gel, la dessiccation, etc. se désagrègent moins lorsqu'ils sont au contact d'un excès d'eau.

Le but de notre travail est d'étudier le mode d'action des matières organiques sur cette stabilité structurale. Les discussions que nous avons évoquées précédemment au sujet du rôle et de l'utilité des matières organiques et le fait que l'on leur reconnaisse au moins trois modes d'action permettent d'imaginer les difficultés que l'on éprouve à interpréter une expérience culturale globale où la matière organique voit son efficacité établie uniquement grâce à des comparaisons de rendement.

L'analyse des phénomènes à laquelle nous nous proposons de contribuer est donc nécessaire, préalablement à toute interprétation.

Notre travail se situera à différents niveaux. Dans une première partie, nous examinerons les mécanismes de stabilisation des différents types de matières organiques.

Dans la deuxième partie, nous chercherons à établir dans des applications pratiques la validité des règles ainsi dégagées.

PREMIÈRE PARTIE

ÉTUDE DES MODES D'ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DU SOL

Introduction

Une fois défini le but général que nous poursuivons, nous devons préciser le problème qui doit être résolu et les méthodes adaptées à l'obtention de ce résultat. Rappelons tout d'abord deux définitions fondamentales :

1° Il faut entendre par *structure* la façon dont les constituants du sol sont disposés les uns par rapport aux autres. Les constituants élémentaires, c'est-à-dire ceux qui sont séparés par une analyse granulométrique, peuvent être parfois simplement juxtaposés : on obtient alors des *structures monoparticulaires* dont les éléments peuvent être plus ou moins rapprochés, ce qui entraîne des différences de porosité et même de cohésion.

Les constituants élémentaires peuvent au contraire être réunis entre eux par des ciments colloïdaux constitués par les fractions élémentaires les plus fines. On peut alors observer des masses continues comme c'est le cas dans les formations aliotiques ou tuffeuses : ce sont les *structures* dites *continues*.

Mais il peut y avoir aussi, et c'est le cas le plus fréquent, fragmentation des ensembles cimentés : la structure est alors qualifiée de *fragmentaire* et l'on peut la caractériser en précisant la forme, la cohésion, la compacité des fragments ainsi que les conditions de leur assemblage.

La propriété globale exprimant le résultat de cet arrangement est la porosité.

2° Toutefois, les différentes données qui viennent d'être évoquées ne peuvent caractériser l'état structural du sol qu'à un moment donné : celui de l'observation qui a permis de les recueillir. En effet, la structure subit une évolution permanente particulièrement dans les sols ou parties de sol qui ont à subir les actions mécaniques de l'homme. Il faut alors tenir compte de la permanence d'un état structural donné vis-à-vis des actions de dégradation et c'est ici qu'apparaît le concept de stabilité structurale. On peut définir celle-ci comme l'aptitude d'une structure à résister aux actions de dégradation.

La méthode la plus directe pour apprécier cette aptitude consisterait à suivre l'évolution des caractéristiques de la structure en fonction de l'intervention des agents de dégradation et en particulier de la pluie. Le coefficient d'efficacité de cet agent fournirait *a contrario*, ainsi que l'a montré S. Hénin (1938), une mesure de cette stabilité. Mais il est évident qu'une telle méthode de travail serait inapplicable à une étude systématique car elle nécessiterait des mesures sur place fréquentes, particulièrement aux périodes caractéristiques. Une telle exigence en limite évidemment les possibilités d'utilisation. Un autre inconvénient provient de l'extrême difficulté qu'il y a à procéder dans le milieu naturel à des mesures suffisamment précises pour mettre en évidence les processus de dégradation.

C'est pourquoi, depuis longtemps, on s'est efforcé d'opérer sur des modèles du phénomène réalisés, en faisant intervenir de différentes façons, au laboratoire, l'action de l'eau sur des fragments de terre dans des conditions standard. C'est par ce

biais qu'il a été possible de montrer l'existence d'un certain nombre de processus de dégradation.

Deux de ces processus paraissent jouer un rôle essentiel. Ce sont :

— Le gonflement et la dispersion des ciments colloïdaux dont SCHLOESING (1885) a souligné l'importance.

— L'éclatement des fragments de terre suivant le schéma de YODER.

Pour définir les facteurs de stabilité, S. HÉNIN (1938) a imaginé une théorie simple dans laquelle interviennent les deux mécanismes. Selon l'hypothèse de YODER (1936), l'eau dans laquelle est plongée une motte de terre pénètre dans les pores capillaires en commençant par les plus gros. L'atmosphère incluse dans le fragment de terre est alors soumise à la pression exercée par les ménisques. Lorsque cette pression est suffisante, la motte éclate.

Le facteur de résistance est la cohésion C de la motte. Cette donnée est assez mal définie car elle décroît au fur et à mesure que la terre se mouille et subit les phénomènes de gonflement et de dispersion des colloïdes. C'est évidemment la cohésion de la terre mouillée qui intervient : une preuve peut en être trouvée dans le fait que les matériaux terreux dont les ciments (oxydes et hydroxydes par exemple) sont peu sensibles à l'action de l'eau, n'éclatent jamais même lorsqu'ils sont peu cohérents à l'état sec.

Dans ces conditions, C représentant la cohésion de la terre humide et P la pression capillaire, la condition de stabilité s'écrira :

$$C > P$$

ou bien en explicitant P :

$$C > \frac{2\,T_2 \cos \alpha}{r}$$

où T_2 est la tension superficielle de l'eau,
α l'angle de raccordement sol-eau,
r le rayon des plus gros capillaires du sol.

Cette relation peut également s'écrire :

$$\text{stabilité} = C - \frac{2\,T_2 \cos}{r}$$

S. HÉNIN a montré que les conséquences de ce schéma étaient conformes à l'expérience. En effet, sous un vide même partiel, ou bien lorsque la terre est imbibée par capillarité, c'est-à-dire en commençant par les pores les plus fins, la stabilité croît. Au contraire, si on mouille la terre sous pression, la stabilité diminue. De même, une modification de la mouillabilité, c'est-à-dire de cos α par fixation au sol d'un corps gras par exemple, accroît la stabilité. Enfin, la teneur en argile qui assure la cohésion du sol, même à l'état humide, est également un facteur croîssant de stabilité.

Ces différents aspects de la théorie sont simples et directement vérifiables. On peut aller plus loin dans l'interprétation des phénomènes, mais cette démarche prend alors un caractère hypothétique, car il faut appliquer aux solides des formules qui n'ont été vérifiées que dans le cas des liquides.

Quoi qu'il en soit, les considérations précédentes fournissent une image très fidèle du comportement du sol dans le milieu naturel. D'autres faits expérimentaux,

d'ailleurs vérifient également cette théorie : par exemple, si l'on imbibe avec précaution des petites mottes de terre avec de l'alcool éthylique, leur stabilité dans l'eau est accrue comme si l'on avait chassé l'air avec précaution par une imbibition capillaire avec de l'eau. On peut remplacer l'alcool éthylique par toute une série de liquides organiques miscibles à l'eau et l'on obtient à peu près les mêmes résultats. L'effet protecteur de la molécule organique tend toutefois à diminuer à mesure que la dimension de sa chaîne hydrocarbonée croît pour un même groupement hydrophile.

Si au contraire on imbibe la terre avec un liquide non polaire et non miscible à l'eau, le benzène par exemple, on obtient alors deux types de résultats : les terres pauvres en matières organiques ont tendance à être beaucoup moins stables, exactement comme si on les avait imbibées d'eau sous une forte pression. Au contraire, si la terre contient des matières organiques, la stabilité est moins modifiée, pouvant même, dans certains cas, être accrue. On peut interpréter ce dernier cas en supposant que le liquide organique non polaire se fixe sur la matière organique du sol, formant ainsi une couche rendant la terre encore moins mouillable.

Bien que datant d'une vingtaine d'années, la théorie dont nous venons de donner les grandes lignes reste encore valable ainsi que le soulignait récemment T. J. MARSHALL (1962). Nous la prendrons donc comme point de départ de nos recherches dont nous pouvons maintenant préciser l'objet :

Quand la matière organique se fixe sur le sol, agit-elle uniquement sur la mouillabilité ou sur la cohésion ou enfin y a-t-il action sur ces deux propriétés ?

Quand on part d'un type de matière organique donnée et en particulier de débris végétaux, quels sont les processus de fixation et dans quelle mesure les différents types se distinguent-ils les uns des autres par leur efficacité ?

Étant donné les interactions existant entre les phénomènes, nous ne pourrons pas adopter comme tête de chapitre chacune de ces questions, Elles serviront de trame à notre conclusion. Nous avons dû, pour des raisons de technique, aborder l'étude des modes d'action des matières organiques sur la stabilité de la structure en suivant le plan indiqué ci-après :

Dans un premier chapitre, nous décrirons les méthodes d'étude que nous avons utilisées portant sur l'appréciation de la stabilité de la structure, la caractérisation des matières organiques et du support minéral.

Après avoir étudié les relations entre d'une part la mouillabilité et la cohésion du sol, d'autre part les résultats de différents tests de stabilité, nous présenterons et discuterons le comportement d'« échantillons-modèles », puis celui d'échantillons enrichis sous différentes conditions de fermentation en diverses matières organiques. Enfin, nous examinerons les modifications expérimentales de stabilité par chauffage ou fermentation d'échantillons humifères et les liaisons entre les caractéristiques granulométriques du support minéral et l'aspect quantitatif de l'efficacité des différents types d'actions précédemment définis.

CHAPITRE PREMIER

LES MÉTHODES D'ÉTUDE

A. Appréciation de la stabilité structurale

Nous avons dit que la méthode la plus évidente et la plus directe pour apprécier la résistance de la structure à l'action de l'eau, qui consisterait à observer les variations de l'état structural sur le terrain en liaison avec l'intensité des différents agents de dégradation, était difficilement applicable dans la pratique.

Pour cette raison, nous avons été amenés à mettre au point une méthode de laboratoire qui soit d'un emploi relativement aisé tout en étant suffisamment sensible et fidèle. Le principe de cette méthode tient compte du fait qu'il est impossible de reproduire fidèlement au laboratoire l'ensemble des conditions de dégradation qui prévalent au champ. Il apparaît alors plus raisonnable de soumettre le sol à une série d'épreuves, chacune de celles-ci tendant à accentuer un des aspects du phénomène complexe naturel. Ce principe nous a conduits à l'utilisation de deux sortes de tests : d'abord une série de tamisages sous l'eau dite « analyse d'agrégats », ensuite un test en milieu concentré qui est ici une mesure de percolation.

I. — Principe et description de l'« analyse d'agrégats »

Il s'agit d'une série de tamisages sous l'eau opérés dans des conditions conventionnelles, définies une fois pour toutes. La caractéristique permettant de distinguer cette technique de celles qui ont été précédemment décrites dans la littérature réside dans le fait que l'on a cherché à apporter d'une manière simple des nuances à l'action de l'eau. Il est en effet commun de remarquer que lors du classement d'une série de comportements, on aboutit fréquemment à deux groupes extrêmes séparés par une frange contenant les échantillons moyens dont le comportement n'est que mal déterminé. Ainsi, l'attaque brutale d'une échantillon de sol sec par de l'eau permet de séparer aisément d'une part les terres très stables et d'autre part celles qui sont presque entièrement dégradées. Par contre, ce traitement sans nuance ne permet pas à lui seul de classer de façon satisfaisante toutes les terres de comportement intermédiaire.

Les travaux de Hénin sur l'action des pré-traitements par des liquides organiques ont permis de trouver une solution, d'emploi commode et se prêtant au travail en série, à cette nécessité d'établir une gradation dans l'action de l'eau. Une imbibition préalable ménagée de l'échantillon par de l'alcool étylique permet, ainsi que nous l'avons vu, d'atténuer cette action et autorise ainsi une certaine discrimination au sein d'un groupe d'échantillons peu stables. D'autre part, un pré-traitement au

benzène opéré dans les même conditions et sur des terres pauvres en matières organiques, donc sans affinité pour ce liquide non polaire, aggrave la destruction de la terre par le traitement ultérieur à l'eau : le piston élastique que constituait l'air présent dans les pores du sol est en effet remplacé par un piston incompressible de benzène, ce dernier n'étant pas miscible à l'eau. Nous reprendrons ultérieurement et préciserons les renseignements que l'on peut tirer de l'utilisation comparée de ces deux pré-traitements avec celle d'un simple apport d'eau sur la terre sèche. Bornons-nous pour l'instant à noter que ce pré-traitement au benzène permet, lui, d'opérer un classement dans le groupe des terres à bonne stabilité structurale dont seules les plus résistantes supportent, au moins en partie, ce traitement énergique.

A la suite de l'action de l'eau sur la terre soit directement soit après les deux pré-traitements que nous venons de mentionner, un tamisage sous l'eau effectué dans des conditions « standard » permet d'obtenir trois taux d'agrégats stables. Mais il apparaît que la permanence ainsi établie d'une certaine quantité d'agglomérats grossiers ne suffit pas à rendre compte du comportement au champ de certains sols. Il arrive en effet que des terres dont en moyenne une partie importante des agrégats grossiers reste sur le tamis acquièrent rapidement sous l'action de l'eau *in situ*, une structure compacte. Ce fait provient de ce que la fraction de l'échantillon qui est passée au travers des mailles du tamis est, dans ce cas, largement dispersée.

Il était donc nécessaire de tenir compte de la quantité d'éléments fins qui se dispersent au cours de la manipulation sans l'intervention d'agents chimiques extérieurs au sol. Une telle mesure est évidemment délicate car la suspension de ces éléments fins ne peut pas recevoir de stabilisant et risque donc de floculer plus ou moins rapidement au cours de la sédimentation préparant la mesure. Cet inconvénient, inéluctable, a été toutefois fortement atténué en choisissant comme limite supérieure des éléments fins un diamètre moyen de 20 μ. Le tri, par sédimentation, de particules de cette taille ne nécessite en effet qu'un temps de quelques minutes, ce qui réduit considérablement les risques de floculation accidentelle qui seraient au contraire très élevés si l'on avait à séparer les éléments dispersés de diamètre moyen inférieur à 2 μ.

Ces quelques principes étant posés, nous allons rappeler sommairement la technique de ces différentes opérations.

a) *Échantillonnage*

A partir de 200 g environ de terre séchée à l'air, passée avec précaution à travers un tamis à mailles carrées de 2 mm. et étendue sur un plateau, on constitue trois prises d'essais de 5 g chacune obtenues en déposant sur le plateau d'une balance quatre ou cinq prises différentes de 1 g chacune environ. Ces précautions sont rendues nécessaires par l'obligation que chaque prise d'essai représente aussi fidèlement que possible la granulométrie moyenne des agrégats telle qu'elle résulte du tamisage à sec préalable de l'échantillon.

b) *Pré-traitements, imbibition par l'eau, agitation*

Chacune des trois prises ainsi obtenues est déposée au fond d'un becher de 250 cc rigoureusement sec. La première est imbibée avec ménagement par environ 5 cc d'alcool éthylique, la deuxième reçoit une même quantité de benzène alors que la

troisième ne reçoit aucun pré-traitement. Au bout de 5 mn, les trois béchers sont brutalement emplis d'eau distillée et l'ensemble est laissé au repos 1/2 heure. Le contenu de chaque bécher est alors transvasé quantitativement dans un erlenmeyer de 700 cc. amené à un volume de 300 cc. et agité 20 fois par retournement.

c) *Tamisage proprement dit*

Le contenu de chaque erlenmeyer est jeté sur un tamis de 200 μ d'ouverture de mailles lequel est adapté à un appareil conçu par A. FEODOROFF (1960) qui lui imprime un mouvement hélicoïdal alternatif dans des conditions de vitesse définies, la toile du tamis baignant dans l'eau d'un récipient pendant toutes les phases du mouvement. Après le tamisage, les agrégats restés sur la toile, c'est-à-dire ceux qui sont dits « stables », sont recueillis dans une capsule, séchés à l'étuve à 105° et pesés. Leurs poids permettront d'établir les taux d'agrégats stables après les divers pré-traitements.

Le « filtrat » du tamisage c'est-à-dire l'ensemble des particules agrégées ou non, d'un diamètre inférieur à 200 μ est amené à un volume dans une allonge de sédimentation et on détermine par la méthode « pipette de Robinson » le taux d'éléments inférieurs à 20 μ mis en suspension par une agitation ménagée, effectuée dans des conditions standard.

e) *Expression des résultats*

Il est indispensable, si l'on veut pouvoir comparer un ensemble de sols, de disposer d'un indice unique dont les composantes soient le résultat des différents tests de l'analyse d'agrégats. L'élaboration de cet indice a été effectué de façon à ce que le classement qu'il permet d'obtenir soit aussi fidèlement que possible le même que celui du comportement *in situ* des différents échantillons. Il se présente sous la forme d'un rapport entre la fraction inférieure à 20 μ obtenue par le traitement le plus dispersant (fréquemment le pré-traitement benzène) et la moyenne arithmétique des trois taux d'agrégats grossiers obtenus comme il est dit précédemment. Le dénominateur de la fraction est diminué des 9/10 des sables grossiers. Il est en effet indispensable de tenir compte principalement des véritables agrégats stables tout en maintenant une place à l'influence favorable sur le comportement du sol vis-à-vis de l'eau des sables supérieurs à 200 μ. Le coefficient 0,9 a été choisi après de multiples essais parce que satisfaisant le mieux cette double exigence.

En résumé, l'indice que l'on désigne couramment par S (ou encore Is) prend la forme suivante :

$$S = \frac{\left(\begin{matrix}\text{Eléments inférieurs} \\ \text{à } 20\ \mu\end{matrix}\right) \quad \% \text{ maximum}}{\dfrac{\Sigma \text{ Agrégats } \%}{3} \quad - 0{,}9 \text{ S. G.}}$$

Cet indice varie en raison inverse de la stabilité de valeurs inférieures à 0,1 pour des terres très stables à des valeurs supérieures à 100 pour des terres sodiques particulièrement fragiles.

On doit toutefois souligner que lors d'une étude particulière visant à mettre en évidence l'évolution d'un sol sous l'action de traitements bien définis, il est parfois

indispensable d'étudier les résultats partiels qui, seuls, permettent l'interprétation du phénomène en cause alors que l'indice S ne fournirait qu'une image brute de la modification globale due à ce phénomène. Par exemple, pour les études portant sur le rôle de la matière organique sur la stabilité, le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène est la donnée qui permet la comparaison la plus sensible des échantillons. C'est ainsi que divers auteurs ont établi des corrélations entre ce taux d'agrégats et la teneur en matières organiques des échantillons dont ils proviennent. Nous verrons que ces corrélations ne sont étroites que si la texture des échantillons est relativement homogène ; il n'en reste pas moins qu'il y a là une présomption en faveur d'une telle méthode de travail. De plus, nous avons pu montrer que la teneur en matière organique des agrégats stables au benzène était beaucoup plus élevée que celle de la terre de départ et même des agrégats obtenus par les autres pré-traitements.

Le tableau I rassemble quelques-uns de ces résultats.

TABLEAU I

Teneurs en matières organiques liées (1) *des différents types d'agrégats stables*
(Teneur exprimée en C p. 1 000 lié)

Sols	Teneurs en carbone			
	Terre totale	Ag_a (2)	Ag_e (2)	Agb (2)
Sous-sol (horizon B)	3,8	3,8	5,7	11,8
Sol de prairie (limon)	22,2	25,7	26,2	31,9
Sol de prairie (argile)	23,4	26,1	27,9	81,5
Terre noire de Limagne (culture)	19,2	19,6	20,6	34,5

(1) Voir page 345.
(2) Ag_a, Ag_e, Ag_b représentent les taux d'agrégats obtenus respectivement après prétraitement alcool, eau, benzène.

Ces chiffres soulignent une différence très importante entre les différents tests : après pré-traitement au benzène, l'action de l'eau conduit à un tri de certains agrégats et seuls ceux qui sont suffisamment riches en matières organiques sont stables ; par contre, dans le cas d'un pré-traitement à l'alcool, rien de tel n'apparaît, la teneur en carbone organique des agrégats stables Ag_a restant voisine de celle de la terre de départ... il n'y a plus tri mais protection plus ou moins intense de l'ensemble des agrégats.

Enfin, l'étude des comportements comparés suivant les pré-traitements, de différents grands types de sols, outre qu'elle met en évidence le caractère nécessaire de ces pré-traitements, souligne la sensibilité particulière de tel ou tel test partiel vis-à-vis de l'influence des différents facteurs de la stabilité structurale :

TABLEAU 2

Comportement comparé aux trois pré-traitements de différents types de sols

Type de comportement	Ag_a %	Ag_e %	Ag_b %
I. — Fraction agrégée, élevée et sensiblement constante.			
Sols argilo-humiques sur alluvions de l'Ouémé (Dahomey).	79,0	76,5	68,1
Sols noirs sur basalte récent (Cameroun)	64,0	63,5	60,5
Rendzines grises sur craie (France)	72,8	64,5	67,6
II. — Fraction agrégée, élevée pour l'alcool et l'air, faible pour le benzène.			
Sols ferrallitiques sur basalte ancien (sous-sol) (Cameroun).	77,1	73,2	0,3
Terre noire de Limagne (sous-sol) (France)	71,0	56,2	8,7
III. — Fraction agrégée, moyenne ou élevée pour l'alcool, très faible pour l'air et le benzène.			
Sous-sol argileux des Landes (France)	47,6	2,3	0,7
IV. — Fraction agrégée, très faible dans tous les cas.			
Sous-sol à montmorillonite magnésienne (Guadeloupe).	0,5	0,4	0,3
Horizon profond de solonetz (France)	2,0	0,5	1,1

II. — Principe et description d'un test en milieu concentré

Les divers tests de l'analyse d'agrégats ne permettent pas, nous l'avons constaté, de mettre en évidence les variations de comportement du sol sous l'influence de modifications relativement faibles de sa composition ionique. C'est ainsi que l'influence du chaulage, manifeste au champ dans certaines conditions, n'est pas mise en évidence par le tamisage sous l'eau. Pour pallier cette insuffisance, nous avons proposé un test pratiqué en milieu suffisamment concentré (rapport terre/eau élevé) pour permettre l'apparition de l'influence des électrolytes. Il s'agit d'une mesure de perméabilité sur échantillons remaniés. Les tubes de percolation sont remplis sous l'eau à partir de l'échantillon calibré et en usant de nombreuses précautions destinées à assurer le dégazage des particules, à éviter leur tri par sédimentation et à leur permettre de gonfler aussi librement que possible. Une charge d'eau constante est ensuite établie et l'on mesure le volume percolé au cours de la première heure. Le résultat est exprimé en prenant comme indice le coefficient de la loi de Darcy exprimé en cm/heure : cet indice est d'autant plus élevé que la terre est plus stable et peut varier de 0 à plus de 60. Bien que la reproductibilité de la mesure soit assez médiocre (l'erreur relative atteint couramment 20 à 30 p. cent) l'amplitude de variation est suffisante pour permettre un classement des différentes terres dans les cas où l'indice S est défaillant.

Traitement	S	K
Chaulage (pH 7,8)	2,30	4,0
Nitrate de soude	2,80	1,25
Témoin sans engrais	2,60	2,75

Comme le montrent les quelques chiffres ci-dessus, obtenus sur un même sol de limon cultivé ayant subi des apports chimiques différents, ce test de percolation peut seul permettre certaines différenciations avec une sensibilité satisfaisante.

Inversement, l'action des matières organiques ressort beaucoup plus fortement de l'analyse d'agrégats et de l'indice S : ainsi que le montre l'exemple ci-dessous.

Traitement	Matière organique %	S	K
Prairie de 3 ans	1,65	2,95	2,85
Témoin (0,15 cm)	1,42	8,62	2,20

Il ressort de ces quelques considérations que ce test de percolation nous sera beaucoup moins utile dans le travail qui fait l'objet de ce mémoire que les divers tests de tamisage. Néanmoins, il était nécessaire de l'évoquer pour deux raisons : la première se rattache au fait que l'analyse d'agrégats devient très imprécise dès que l'on a affaire à des échantillons contenant une proportion importante de sables de dimensions voisines de 200 μ ; le test K permet alors de contrôler des résultats incertains. La deuxième raison est que l'absence de réactions aux tests en milieu concentré alors même que les valeurs de S sont fortement affectées peut dans certains cas aider à l'interprétation d'un phénomène agronomique complexe comportant sous une forme ou sous une autre l'intervention de matières organiques. C'est pourquoi nous ferons appel à K principalement au cours des études agronomiques qui constitueront la deuxième partie de ce mémoire.

III. — Comparaison générale des résultats

S variant en raison inverse et K en raison directe de la stabilité structurale, si l'on porte sur un graphique les points représentatifs d'une population de sols d'origine et de propriétés diverses (S en abscisse, K en ordonnée) ils se groupent autour d'une branche de courbe d'équation $K = \frac{A}{S^n}$. Après transformation logarithmique des variables, cette liaison est traduite par une régression linéaire d'équation approximative obtenue pour les 100 premiers points expérimentaux (coefficients arrondis) :

$$3 \log_{10} 10\,K + 2{,}5 \log_{10} 10\,S - 7{,}5 = 0$$

La transformation logarithmique permet une meilleure lecture du graphique pour les valeurs moyennes de S et de K qui correspondent à la majorité des caractéristiques des sols cultivés. La dispersion autour de la droite de régression est due au fait que ce ne sont pas, nous l'avons vu, les mêmes facteurs qui influent sur les deux indices. Chaque sol se trouve ainsi caractérisé par la position d'un point par rapport à l'ensemble des sols déjà connus.

B. Caractérisation des matières organiques

I. — Fractionnement densimétrique des matières organiques

Les matières organiques du sol sont composées d'un ensemble de corps d'origine et de nature très différentes. On a coutume d'apprécier la teneur en matières organiques totales en dosant la quantité de carbone, autre que celui provenant des car-

bonates, présent dans le sol. Toutefois, l'hétérogénéité de ces constituants est telle qu'elle peut apparaître, pour une part au moins, à l'observation optique directe. C'est ainsi qu'à côté des nombreux composés liés à la fraction minérale du sol, il existe des débris végétaux ou animaux à des stades variables de décomposition mais dont la caractéristique commune est de ne pas être liés au support minéral. Cette observation a conduit S. HÉNIN et L. TURC (1949) à proposer, préalablement à toute étude quantitative ou qualitative de l'humus, une séparation de cette matière organique libre.

Le principe de la méthode proposée par ces auteurs repose sur le fait que la densité absolue des matières organiques libres supposées exemptes de toute souillure minérale est voisine de 1 alors que la densité absolue de tout le reste du sol est beaucoup plus élevée, généralement supérieure à 2. L'idée est alors née de fractionner densimétriquement les matières organiques du sol par immersion d'un échantillon convenablement préparé dans un liquide dont la densité soit intermédiaire entre celles des deux fractions que l'on veut séparer.

HÉNIN et TURC opéraient dans le champ de la pesanteur ce qui ne permettait pas toujours la séparation de matières organiques libres fines ou ayant subi un début de fixation à la fraction minérale. Pour pallier cet inconvénient, nous avons récemment mis au point (G. MONNIER et al. (1962) une technique basée sur le même principe, mais permettant d'opérer dans un champ de gravité beaucoup plus intense (de l'ordre de 1 000 *g*) (1) fourni par l'accélération d'une centrifugeuse. Ce perfectionnement nous a permis d'améliorer la reproductibilité des résultats et d'obtenir des fractionnements beaucoup plus satisfaisants, particulièrement lorsque les échantillons sont riches en débris organiques très fins ou au premier stade de leur fixation au sol. D'autre part, la manipulation devient beaucoup plus aisée et se prête facilement au travail en série.

Description de la technique

L'échantillon constitué à partir de terre séchée à l'air passant au tamis de 2 mm peut être de cinq ou de dix g. suivant la teneur supposée en matières organiques libres. Il est en effet commode de traiter une prise de terre telle que la fraction peu dense obtenue puisse constituer la totalité de la prise d'essai en vue du dosage ultérieur du carbone qu'elle contient. En tout état de cause, on doit apporter un grand soin à la constitution de la prise d'essai qui doit être représentative de l'échantillon.

Un broyage, suivi d'un tamisage à 500 µ, permet de libérer certains débris organiques emprisonnés mécaniquement dans les agglomérats. Ce moyen est préférable à une destruction de la structure plus rapide et ne risque pas de provoquer de redistribution de substances solubles ou pseudo-solubles.

L'échantillon ainsi préparé est placé dans un tube de centrifugeuse de 100 cc qui est ensuite empli avec le liquide densimétrique choisi. Après une centrifugation de 5 mn conduite à une vitesse telle que l'accélération au centre du tube soit de l'ordre de 1 000 *g*, la fraction légère, constituée essentiellement, si la densité a été convenablement choisie, par de la matière organique libre, est décantée sur un filtre plat, séchée à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant, et pesée. Il peut être utile de remettre le liquide en suspension et de recentrifuger pour séparer les matières orga-

(1) $g = 981$ CGS

niques libres qui auraient pu rester emprisonnées lors de la première centrifugation. Cette correction qui en résulte, négligeable dans le cas général, peut devenir indispensable dans le cas de terres très riches en matières organiques libres. Les manipulations sont rendues aisées, en particulier lors des décantations de la fraction peu dense, par le fait que les culots, si le liquide densimétrique est constitué par un mélange alcool éthylique-bromoforme, présentent une cohésion suffisante quelle que soit la texture de l'échantillon. On aura toutefois soin de ne pas utiliser un dispositif de freinage à la fin de la centrifugation pour éviter une remise en suspension partielle de la fraction la plus dense.

Les tubes contenant les fractions denses sont également séchés à l'étuve à 105°. Lorsqu'on desire un séchage rapide, ou lorsque l'étude chimique des fractions nécessite un séchage à plus basse température, il est possible d'éliminer le bromoforme par un lavage des fractions à l'alcool avant leur mise à l'étuve.

C'est un mélange de densité 2 qui permet le plus couramment de séparer dans les meilleures conditions les deux formes libres et liées. Toutefois, dès que les fractions denses contiennent des teneurs élevées (supérieures à 6 ou 7 p. cent) en matières organiques liées, comme cette dernière n'est pas également répartie sur toutes les particules du support minéral, elles risquent d'avoir, pour une partie au moins, une densité inférieure à 2 ; on choisira alors un mélange de densité 1,75. Cette précaution s'impose d'autant que le sol étudié est plus riche en calcaire.

Caractérisation des fractions

Cette technique de fractionnement du sol nous intéresse dans la mesure où elle permet de séparer et de doser à part des matières organiques complètement différentes. La caractérisation de ces deux types de matières organiques peut se faire d'une façon suffisante par l'évaluation de leur rapport C/N. D'une façon très générale, le rapport C/N des fractions denses varie très peu quel que soit le sol et présente des valeurs très voisines de 10. Des études poursuivies par L. TURC (1949) ont montré d'ailleurs que la matière organique de ces fractions pouvait, en règle générale, être assimilée à l'humus. Au contraire, les fractions peu denses constituées essentillement par des débris organiques comme le montrent leur teneur en carbone élevée (de l'ordre de 20 p. cent) et l'examen microscopique direct, ont des rapports C/N beaucoup plus élevés et variables de 15 à près de 100 suivant la nature et le degré d'évolution des débris végétaux qui en sont l'origine.

On voit ainsi que la caractéristique de la matière organique totale du sol par le rapport carbone organique *total*/azote *total* est assez illusoire car elle n'aboutit en fait qu'à refléter une incidence brute dans laquelle interviennent aussi bien le pourcentage de matières organiques qui sont sous une forme libre que la nature même de ces dernières. Nous avons d'ailleurs montré (G. MONNIER 1958) comment il était possible de calculer le rapport C/N de la terre totale à partir des résultats du fractionnement et du C/N de la seule fraction libre ; ce C/N calculé est très proche du C/N obtenu expérimentalement à partir de la terre totale.

Mais les résultats du fractionnement offrent également d'autres possibilités d'interprétation. Il est en effet possible d'assimiler les matières organiques libres à des produits d'apport relativement récent ou dont l'évolution n'a pas été permise en raison des conditions du milieu. On voit tout l'intérêt qu'on peut en retirer dans

l'étude tant *in vitro* qu'au champ de l'amélioration de la stabilité structurale des sols à partir de résidus organiques. Nous aurons l'occasion de fournir tout au long de ce mémoire de nombreux exemples des bénéfices que l'on peut tirer d'une telle interprétation.

En ce qui concerne la matière organique liée, que nous désignerons par le terme général d'*humus*, elle est constituée par un grand nombre de composés pouvant présenter des propriétés physico-chimiques très diverses et même, dans certains cas, opposées. Il existe des méthodes permettant de fractionner cet ensemble ; les critères de fractionnement reposent sur le comportement et la solubilité de certains groupes de constituants dans divers réactifs d'extraction. Toutefois, ces techniques ne permettent pas, au moins en l'état actuel de nos connaissances, d'aborder le problème qui nous préoccupe. Il apparaît en effet très vite que dans l'action des matières organiques sur la stabilité structurale, certains corps d'origine microbienne, certains produits « pré-humiques » jouent un rôle fondamental ; d'autre part, le mode de fixation des matières organiques apparaît également comme ayant un rôle prépondérant par rapport à celui que peut jouer leur composition même. Pour ces raisons nous avons considéré qu'une première analyse devait porter sur les notions de liaison à la partie minérale du sol, d'origine et de mode de fermentation, de répartition au sein du matériau à stabiliser.

II. — Dosage du carbone organique

L'appréciation de la teneur en matières organiques de chacune des fractions se fait à partir d'un dosage de carbone organique ou plutôt d'un pouvoir réducteu lequel est transformé en taux de carbone par un coefficient déterminé empiriquement et valable globalement pour les matières organiques de sol. Cette évaluation du pouvoir réducteur du sol est faite suivant la méthode mise au point par P. Anne (1945). Le principe en est une oxydation dans des conditions standard d'un échantillon de sol par un mélange sulfo-chromique

III. — Dosage de l'azote organique

Un avantage de l'attaque sulfo-chromique réside dans le fait qu'elle assure simultanément la minéralisation sous forme de sulfate d'ammonium de l'azote organique. Le carbone et l'azote, éléments constitutifs du rapport C/N peuvent donc ainsi être déterminés sur deux aliquotes de la même attaque (Anstett, 1958), ce qui diminue considérablement les risques d'erreur sur leur quotient. Certes, L. Turc (Communication personnelle de l'auteur) a constaté que la minéralisation sulfo-chromique de l'azote organique n'intéressait que 95 p. 100 en moyenne de l'azote minéralisé selon la technique classique de Kêeldahl. Cependant, outre le fait que l'on peut toujours utiliser un terme correctif pour tenir compte de cette minéralisation incomplète, les avantages tirés d'une attaque commune en vue des deux déterminations sont suffisants pour que nous ayons adopté cette technique.

L'ensemble de ces techniques : fractionnement densimétrique, dosage du carbone et de l'azote organique sur chacune des fractions, permet de définir un ensemble

de caractéristiques du sol étudié. Le tableau 3 rassemble ces données pour quelques sols particuliers

TABLEAU 3

Exemples de fractionnement densimétrique des matières organiques du sol, Caractérisations des fractions

Désignation des échantillons (Prise d'essai 10 g)	Fraction peu dense F_e(d < 2)				Fraction dense F_d(d < 2)		
	F_e(mg)	C mg dans 1 g de F_e	C/N	C mg (de F_e) dans 1 g de terre t.	C mg dans 1 g de F_d	C/N	$\frac{C\ ‰\ F_e}{C\ ‰\ \text{total}}$
Jeune prairie sur sable fin n° 636	212,5 (201,5) *	201 (202)	16,8 (17,3)	4,27 (4,07)	6,2	9,6	40,4
Rendzine blanche sur craie n° 650 (culture)	194 (191,5)	228 (228)	26,2 (26,2)	4,42 (4,37)	22,3	8,9	16,0
Vieille prairie sur limon n° 115	336 (337)	240 (240)	20,7 (20,2)	8,06 (8,08)	16,05	9,8	33
Sous-sol de limon enrichi en matière organique (farine de luzerne)	332 (338)	214 (211)	27,5 (27,6)	7,10 (7,13)	17,7	9,85	28,6
42 parcelles témoin	455	326	40,7	1,5	8,85	9,3	14,4
42 parcelles fumier	411	209	17,7	8,6	17,85	12,0	33,5

* Les résultats entre parenthèses concernent des analyses faites en double.

C. Caractérisation du support minéral

La notion la plus couramment utilisée pour caractériser les propriétés physiques d'un sol est celle de texture. Cette dernière est la propriété résultant de la répartition des particules élémentaires du sol en différentes classes de taille ; en d'autres termes, elle est une conséquence globale de la granulométrie du sol. C'est donc essentiellement la détermination de la granulométrie que nous avons utilisée pour caractériser les supports minéraux. Nous rappellerons brièvement les principes de l'analyse granulométrique telle que nous l'avons pratiquée.

La première opération consiste à préparer l'échantillon par une séparation complète des particules élémentaires du sol les une d'avec les autres. Ce résultat est obtenu d'abord par une destruction des ciments organiques qui est réalisée par oxydation à l'eau oxygénée.

Il s'agit ensuite d'assurer une dispersion stable des colloïdes minéraux. Pour les

sols non calcaires, il est possible de parvenir à ce résultat par agitation de la terre préalablement saturée par un cation monovalent en présence d'un agent dispersant et stabilisant tel que l'hexamétaphosphate de sodium ou le citrate de sodium. Lorsque la terre est calcaire, la décalcification du complexe est souvent obtenue après destruction complète des carbonates. Dans ce cas, l'étude granulométrique ne portera évidemment que sur la fraction non calcaire du sol. Cette manière de faire, dite « méthode internationale », présente des inconvénients majeurs dès que l'on a affaire à des sols contenant des quantités notables de carbonate de calcium, ce qui est le cas pour de nombreuses terres agricoles. En effet, il n'est pas indifférent que les carbonates présents dans le sol le soient à l'état de particules de la taille de l'argile ou de celle des sables grossiers. Pour parer à cette difficulté, DEMOLON (1948) a proposé une méthode permettant de disperser des sols calcaires sans destruction préalable des carbonates. Une telle méthode peut être utilisée pour tous les sols, qu'ils soient ou non calcaires, et fournir la granulométrie de l'ensemble de la partie minérale, carbonates insolubles compris.

Enfin les techniques classiques de détermination des minéraux des argiles (analyse thermique différentielle, rayon X, etc.) nous ont permis dans certains cas particuliers de préciser la nature de la fraction la plus fine du sol lorsque ce dernier n'était pas suffisamment défini par la répartition granulométrique de ses constituants

CHAPITRE II

ÉTUDE DE LA « COHÉSION » ET DE LA MOUILLABILITÉ DU SOL

Nous avons vu que, suivant la théorie de HÉNIN, la condition de stabilité pouvait s'écrire :

$$C - \frac{2\,T_2 \cos \alpha}{r} > 0.$$

Les deux facteurs sur lesquels il est possible d'agir directement sont donc C qui représente la cohésion de la particule de terre au moment où se produit le phénomène d'éclatement et α qui mesure l'angle de raccordement sol-eau, cos α variant donc en raison inverse de la mouillabilité du sol. Par contre le rayon r qui mesure le diamètre des plus gros capillaires du sol est une donnée sur laquelle il est difficile d'avoir une influence directe : il s'agit là en effet d'une caractéristique de la structure elle-même.

Étant donné que la plupart des matières organiques ont la propriété, liée à leur nature et à la manière dont elles sont fixées au sol, de modifier simultanément, bien que dans des proportions différentes, C et cos α, nous ne chercherons pas à étudier séparément l'action des matières organiques sur la cohésion puis la mouillabilité du sol. Nous nous proposons au contraire, pour chaque type de matière organique étudié, de rechercher quel est le mécanisme dominant de son action sur le comportement du sol vis-à-vis de l'eau.

C'est d'abord à partir des propriétés connues de certaines matières organiques apportées au sol que nous chercherons à mettre en évidence l'action des deux principaux facteurs de stabilité.

Il existe en effet des substances organiques dont les longues molécules ont une action floculante sur l'argile parce qu'elles sont capables d'accrocher un ensemble de micelles. Cette propriété étant due à des fonctions COOH, de telles substances sont hydrophiles et l'on peut donc penser *a priori* que, fixées au sol, elles augmenteront sa cohésion sans diminuer, voire en augmentant sa mouillabilité. Dans ce groupe il faut ranger les polyacrylates et les carboxyméthylcelluloses.

Mais nous pouvons aussi fixer sur la terre des petites quantités de matières organiques ayant des propriétés hydrophobes, telles que divers acides gras, de la cire d'abeille... etc. De telles substances ne sont pas susceptibles de modifier par elles-mêmes la cohésion du sol mais elles réduisent sa mouillabilité. Il suffit pour s'en convaincre de mettre une échantillon de terre en contenant, au contact de l'eau : chaque bulle d'air est tapissée d'une couche de terre.

Enfin, dans le cadre fourni par ces éléments de référence nous avons examiné le mode d'action de matières organiques « naturelles » telles que des acides humiques

extraits du purin, ou celui des produits fixés au sol par fermentation de matières organiques telles que glucose ou débris végétaux divers.

Avant d'aborder ce sujet proprement dit, il est toutefois nécessaire de préciser les définitions de la cohésion C et de la mouillabilité du sol et d'étudier les méthodes permettant de les apprécier.

I. — Définition et mesure de C

Lorsqu'on met un fragment de terre au contact de l'eau d'une façon suffisamment ménagée pour éviter sa destruction, sa cohésion évolue au cours de l'humectation. Les différents ciments organiques et minéraux au fur et à mesure qu'ils absorbent de l'eau voient leurs propriétés mécaniques modifiées plus ou moins suivant les cas. C'est la cohésion finale résultant de cette évolution (gonflement, dispersion) qui constitue la caractéristique du sol intervenant dans le schéma proposé par Hénin et que nous avons à apprécier.

a) *Appréciation de la cohésion de la terre humide par une mesure directe*

Nous nous sommes basés sur la mesure de la déformation d'un échantillon de terre préalablement humecté et soumis à des pressions croissantes dans des condition standard, l'échantillon étant susceptible de fluer latéralement. Cette mesure n'étant pas applicable à des particules de terre, de forme irrégulière, nous avons dû reconstituer des pâtons de forme géométrique définie. Ce n'est donc pas la « cohésion » originelle de la terre qui apparaît mais seulement les liaisons qui se sont établies au sein du pâton au cours de la fabrication. La méthode n'est valable que pour des terres plastiques et a été appliquée principalement d'une façon comparative à différents échantillons d'une même terre ayant subi divers traitements. Une telle méthode ne serait pas applicable à l'étude de terres à ciments fragiles tels que des hydroxydes par exemple.

La forme régulière des pâtons, indispensable à la reproductibilité des résultats de la mesure, a été obtenue en opérant de la façon suivante : l'échantillon de sol est délayé dans son poids d'eau pendant une demi-heure. La pâte qui résulte de cette opération est ressuyée sur Buchner, la fissuration étant orientée le long de stries tracées à la surface qui permettront après séchage à l'air de découper les galettes en petits cubes de 6 à 8 mm d'arête.

Les pâtons ainsi obtenus sont alors imbibés d'eau de façon ménagée pour amener leur « cohésion » à la valeur particulière qui nous intéresse, tout en évitant leur destruction. Nous nous sommes appuyé pour cela sur les observations de Hénin déjà citées selon lesquelles une imbibition sous vide ou par capillarité réduisait considérablement l'éclatement. L'humectation a donc eu lieu sous vide et à partir d'une plaque de porcelaine de porosité très fine. Grâce à ce procédé, même les pâtons constitués à partir des terres les plus instables ont conservé une forme géométrique définie.

Les échantillons sont ensuite soumis à des efforts croissants s'exerçant dans le sens de la compression. On mesure alors la déformation permanente du cube de terre. Chaque série de mesures permet de tracer une courbe qui pour chaque échantillon

représente les variations de l'épaisseur du pâton en fonction des forces appliquées.

La position des différentes courbes les unes par rapport aux autres permet d'établir un classement des échantillons sur une échelle de « cohésion » dont les valeurs sont conventionnellement définies par la pente de la courbe au voisinage de l'origine des efforts. Le graphique 3 illustre ce qu'on peut attendre d'un tel mode opératoire.

A l'aide de ce test, nous avons tout d'abord voulu mettre directement en évidence l'influence des traitements avec des substances organiques diverses. Nous avons ensuite recherché s'il existait une relation entre cette première gamme de comportement et les résultats d'une technique indirecte reposant sur l'action de certains prétraitements avant tamisage sous l'eau.

b) *Utilisation des prétraitements pour déterminer la part revenant à une augmentation de cohésion dans un phénomène de stabilisation*

Lorsqu'on traite un échantillon de sol de façon à modifier ses seules propriétés mécaniques, on constate que s'il en résulte une modification de stabilité celle-ci apparaît d'autant mieux au tamisage sous l'eau que l'échantillon est imbibé au préalable par un liquide polaire présentant une plus grande affinité pour l'eau.

Nous avons comparé par exemple la stabilité de deux types d'agrégats d'horizon B. Les uns « naturels » sont extraits par tamisage à sec du prélèvement ; les autres « artificiels » sont obtenus par simple agglomération au contact d'une quantité limitée d'eau de particules fines (inférieures à 200 μ) provenant du broyage du matériel précédent.

On constate que seuls l'alcool éthylique et mieux encore le dioxane utilisés en prétraitement font apparaître une différence notable de comportement au cours du tamisage sous l'eau entre ces deux séries d'agrégats. L'action directe ou après prétraitement au benzène de l'eau est trop brutale pour faire apparaître l'influence d'une modification de la seule cohésion.

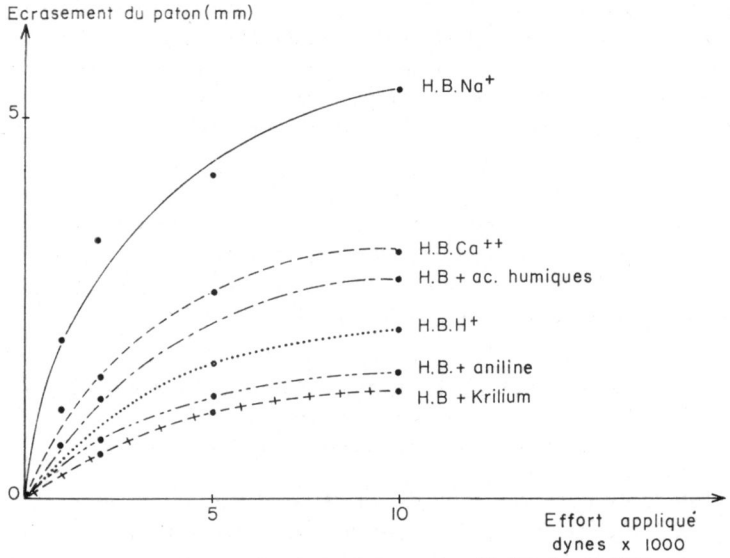
Le tableau ci-après illustre cette observation.

TABLEAU 4

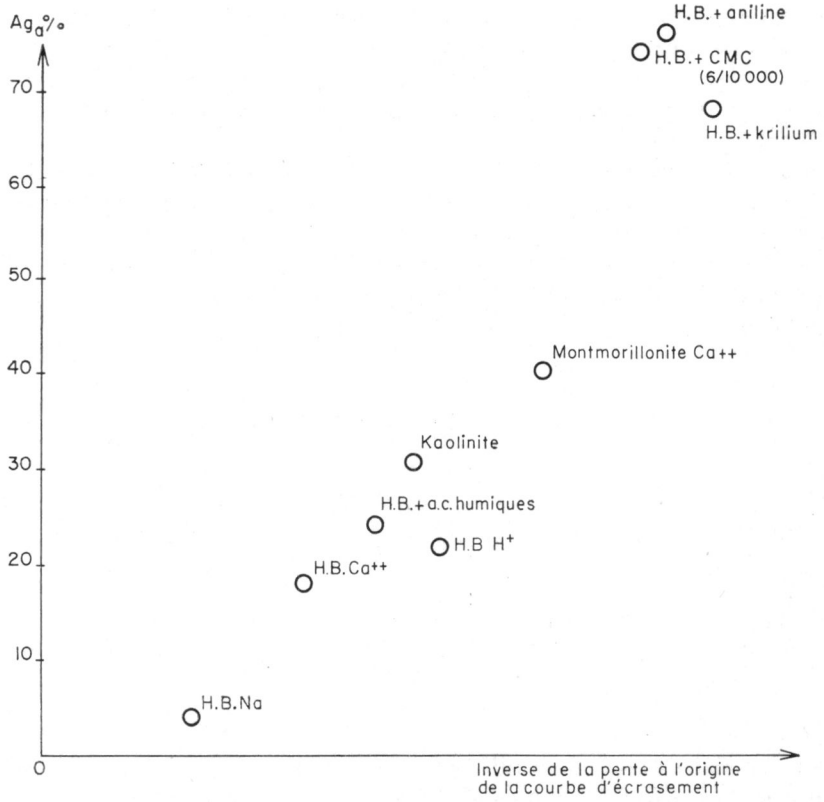
Stabilité comparée d'agrégats naturels et artificiels

Échantillon	% agrégats stables après prétraitement			
	Air	Alcool éthylique	Dioxane	Benzène
Agrégats naturels	4,9	17,0	50,5	1,5
Agrégats artificiels	0,4	6,4	15,4	0

Rappelons d'autre part que l'étude du comportement comparé des grands groupes de sols vis-à-vis des différents prétraitements (voir p. 24) a clairement fait apparaître que seul le traitement à l'alcool était susceptible de rendre compte de différences de stabilité structurale observées *in situ* entre deux sols ne se distin-



GRAPHIQUE 3. — *Appréciation de la cohésion de la terre humide d'horizon B différemment traitée*



GRAPHIQUE 4. — *Relation entre la cohésion de la terre humide et le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique*

guant que par leur teneur en argile granulométrique, par la nature minéralogique de celle-ci ou par sa garniture ionique, toutes caractéristiques influençant principalement la cohésion du sol.

Étant donné l'intérêt pour notre recherche d'une telle hypothèse, si elle s'avérait fondée, nous avons cherché à vérifier qu'il existait une relation entre les résultats de l'appréciation directe de la cohésion de la terre humide selon la méthode que nous avons décrite (pente au voisinage de l'origine) et la stabilité de l'alcool (Ag_a p. 100) des pâtons. Le graphique 4 indique que les points expérimentaux se groupent le long d'une droite. Il faut cependant remarquer que l'action d'une matière organique étant toujours plus ou moins complexe, le résultat positif du test à l'alcool pratiqué sur un sol traité ne pourra indiquer qu'une tendance en faveur de la prédominance d'une action de type « cohésion » ; il est bien évident qu'un traitement organique qui rendrait la terre très peu mouillable sans pour autant modifier sa cohésion, provoquerait lui aussi un accroissement du taux d'Ag_a avec toutefois, dans ce cas, une modification simultanée du taux Ag_b p. cent.

II. — Définition et mesure de la mouillabilité

L'angle α de raccordement sol/eau n'est pas directement mesurable dans le cas du sol. La hauteur maxima d'ascension capillaire $H = \frac{2\,T_2 \cos \alpha}{r}$ est beaucoup trop influencée par les hétérogénéités dans la valeur de r pour fournir un terme de comparaison de diverses affinités sol/eau. Aussi L. Turc, dans une étude non publiée, avait-il mis au point un test de mouillabilité basé sur la mesure de la proportion de particules calibrées restant accrochées à un interface eau/benzène. Nous avons obtenu des résultats comparables à ceux obtenus par cet auteur en utilisant une méthode plus rapide bien que moins précise basée sur l'appréciation de la vitesse initiale d'ascension capillaire.

Rappelons que cette vitesse est de la forme :

$$V = k\,\frac{\varphi\,(z)}{H}\,\frac{2\,\frac{A_r \cos \alpha}{r} - z}{z},$$

Z représentant la hauteur du front d'humectation par rapport au plan d'eau libre et k un coefficient constant. On peut raisonnablement admettre que pour les faibles valeurs de z, c'est-à-dire au début de d'ascension capillaire, cos α détermine V.

En effet, pour 2 valeurs α_1 et α_2, toutes choses égales par ailleurs :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{2\,A \cos \alpha_1 - rz}{2\,A \cos \alpha_2 - rz}$$

La technique que nous avons utilisée est alors la suivante : des échantillons d'agrégats calibrés d'un même sol ont été soumis à divers traitements de façon à ne modifier que leur mouillabilité.

Chaque lot a été ensuite introduit dans des conditions standard dans un tube de verre dont la base a été mise au contact d'un plan d'eau. La comparaison de la hauteur du front d'humectation capillaire dans les différents tubes au bout d'un

temps donné de l'ordre de la minute, fournit une évaluation de la mouillabilité du sol en valeur relative pour un même support minéral.

Par la méthode de flottaison L. TURC avait dans une étude non publiée montré l'influence des cations adsorbés, sur la mouillabilité du sol. Le tableau 5 compare les résultats avec ceux que nous avons obtenus par des mesures de vitesse initiale d'ascension capillaire.

TABLEAU 5

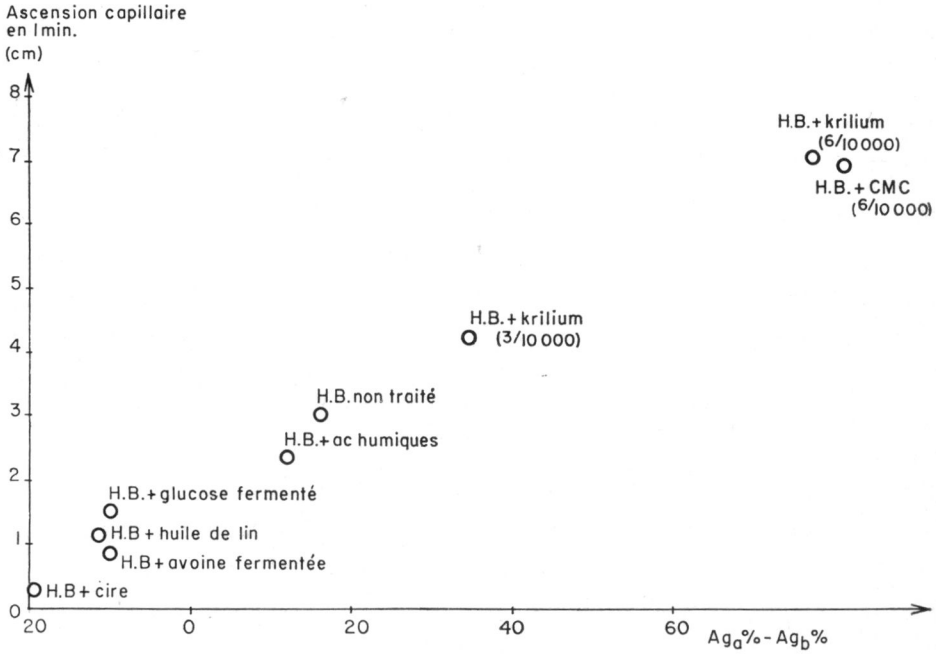
Étude par deux méthodes de l'influence des cations du sol sur sa mouillabilité

Échantillons	Terre H^+	Terre H^+Ca^{++}	Terre Ca^{++}
p. 100 de la terre accrochée à l'interface eau/benzène (TURC).....	43	18	12
Ascension capillaire en 2 mn (mm).....	32	42	45

On constate qu'il existe un accord satisfaisant entre les résultats des deux méthodes et entre ces résultats et ce qu'on sait de l'affinité pour l'eau des ions H^+ et Ca^{++}.

Par ailleurs, on peut constater qu'il existe une relation entre la vitesse initiale d'ascension capillaire et la différence $Ag_a - Ag_b$, cette dernière étant d'autant plus faible (elle peut même atteindre des valeurs négatives) que le sol est moins mouillable pour une « cohésion » donnée.

Le graphique 5 représente cette relation.



GRAPHIQUE 5. — *Relation entre la mouillabilité du sol (vitesse d'ascension capillaire) et l'effet spécifique du prétraitement au benzène* (Ag_a % — Ag_b %)

***

Ainsi le tamisage sous l'eau d'un échantillon de sol préalablement imbibé avec certains liquides organiques est susceptible de fournir deux sortes d'indication.

Tout d'abord, nous l'avons vu, une telle série de tests permet de placer le sol étudié sur une échelle de stabilité qui reproduit fidèlement le classement des différents comportements tels qu'on peut les observer au champ. C'est là une garantie portant sur le caractère global de l'étude ainsi pratiquée et sur la valeur de l'interprétation agronomique que l'on pourra en tirer.

Par ailleurs, nous avons constaté que les résultats obtenus dans certains tests étaient liés aux valeurs appréciées d'une façon directe de certains facteurs essentiels de la stabilité. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs, Ag_b varie en raison inverse de la mouillabilité du sol et Ag_a en raison directe de la « cohésion ». Ces liaisons sont confirmées par le comportement comparé aux différents tests de sols naturels présentant des propriétés bien caractéristiques (voir p. 344).

Il est donc possible par la comparaison des résultats des différents prétraitements de connaître le mécanisme dominant de la stabilisation due à un traitement donné.

CHAPITRE III

ÉTUDE DES « ÉCHANTILLONS-MODÈLES »

Notre plan de travail comporte, en premier lieu, l'étude d'échantillons enrichis en matière organique à l'aide de substances définies et dont en conséquence les propriétés peuvent être connues. Cette étude est destinée à fournir un cadre à l'interprétation du comportement d'échantillons contenant des matières organiques complexes dont le type d'action sur le sol ne peut être préjugé.

I. — Préparation des échantillons-modèles

Afin de simplifier la comparaison des produits étudiés nous les avons fixés sur un support minéral unique : l'horizon d'accumulation (horizon B) d'un sol de limon de Versailles. La composition granulométrique de l'horizon B est présentée dans le tableau 6.

TABLEAU 6

Granulométrie de l'horizon B

Fractions	Matières organiques	< 2 μ	2-20 μ	20-50 μ	50-200 μ	200 μ 2 mm
p. 100 de terre séchée à 105°	0,6	32,0	40,5	20,0	4,8	2,1

Ce matériau a l'avantage d'être suffisamment riche en éléments fins et en particulier en argile ; il est pauvre en sables grossiers dont, nous l'avons vu, la présence diminue la précision des déterminations de stabilité par les tests de l' « analyse d'agrégats ».

Enfin sa teneur en matières organiques est suffisamment faible pour n'avoir qu'une influence négligeable sur son comportement.

Les matières organiques choisies ont été appliquées en solution ou pseudo-solution dans l'eau ou dans un solvant organique volatil sur des agrégats du support de diamètre inférieur à 2 mm.

Il était nécessaire de disposer d'une technique permettant d'obtenir des témoins (échantillons mis au contact du solvant sans la matière organique) présentant une

stabilité inchangée par rapport à celle du matériau de départ. Il s'est avéré que pour que cette condition soit remplie il fallait :

— appliquer progressivement la solution organique par une pulvérisation très fine ;

— veiller à ce que l'humidité (dans le cas des solutions aqueuses) ne dépasse pas une certaine valeur, soit 25 p. 100 pour l'horizon B ;

— lorsque le solvant utilisé est le benzène ces précautions sont inutiles et il suffit de mettre les agrégats directement au contact d'une quantité de solution suffisante pour imbiber la totalité de l'échantillon.

L'échantillon traité est séché à l'air et retamisé avec précaution à 2 mm de façon à séparer les agrégats qui auraient pu s'agglomérer entre eux malgré les précautions prises.

Les substances organiques choisies pour l'élaboration de ces échantillons modèles ont été :

— un polyacrylate de sodium (le krilium), une carboxyméthylcellulose (CMC) et des acides humiques extraits du purin, apportés en pseudo-solution aqueuse.

— de la cire d'abeille, de l'acide oléique et de l'huile de lin en solution benzénique.

II. — Les résultats

Les résultats du tamisage sous l'eau après divers prétraitements effectués sur les échantillons sont rassemblés dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Comportement des échantillons modèles

Prétraitements →	Taux d'agrégats stables après divers prétraitements				
Échantillons ↓	Air	Alcool	Dioxane	Benzène	Nitrobenzène
Carboxyméthylcellulose	56 (800)	77 (452)	81 (162)	15 (600)	30 (1 000)
Polyacrylate	48 (685)	69 (406)	80 (160)	10 (400)	26 (866)
Acide oléique	20 (285)	30 (176)	50 (100)	8 (320)	29 (966)
Huile de lin	32 (457)	42 (247)	56 (112)	57 (2 280)	54 (1 800)
Acides humiques	17,5 (250)	23 (135)	48 (96)	14 (560)	18 (600)
Cire d'abeille	35 (500)	44 (258)	70 (140)	36 (1 440)	82 (2 733)
Témoin Horizon B	7 (100)	17 (100)	50 (100)	2,5 (100)	3 (100)

Les chiffres entre parenthèses correspondent à un indice calculé sur la base 100 pour le support minéral témoin dans chaque prétraitement.

Les quantités de substances apportées correspondent à 1 p. 100 de la terre sèche, sauf en ce qui concerne le krilium et la carboxyméthylcellulose pour lesquels l'effet maximum est atteint à une dose de 1 p. 1000.

On constate que les propriétés conférées au sol par la fixation de ces diverses substances organiques se manifestent bien comme on pouvait le prévoir.

C'est ainsi que les longues molécules de polyacrylate et de carboxyméthylcellulose permettent d'obtenir une quantité importante d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool et plus encore au dioxane. Rappelons que le résultat de ce test s'est montré en corrélation étroite avec les mesures de « cohésion » et que celles-ci ont montré directement l'accroissement de résistance consécutif à la fixation de polyacryalte et de carboxyméthylcellulose.

Au contraire la fixation d'acides gras, tels que l'acide oléique et surtout l'acide linoléique contenu dans l'huile de lin, ou de cire d'abeille s'est traduite par un remarquable accroissement de stabilité lorsque la terre est prétraitée au benzène avant le tamisage sous l'eau. Or nous avons constaté la liaison existant entre le comportement après ce prétraitement et le test de mouillabilité à partir de la vitesse initiale d'ascension capillaire. Ainsi c'est bien un effet antimouillant que l'on met en évidence. Par analogie on constate que les acides humiques confèrent au sol un comportement équivalent bien que moins marqué.

Les corps agissant sur la cohésion que nous avons étudiés accroissent, nous l'avons vu (p. 356), la mouillabilité du sol.

Leur fixation devrait donc provoquer une destruction plus rapide des agrégats si elle n'affectait pas également, mais dans un sens opposé, la cohésion.

Au contraire les acides gras se montrent relativement moins efficaces sur la cohésion que les longues molécules organiques.

Ainsi nous pensons avoir constitué une gamme de substances de référence qui grâce à la concordance entre les appréciations directes et le comportement après divers prétraitement nous permet de préciser une dernière fois le sens des tests utilisés pour évaluer la stabilité de la structure et par voie de conséquence nous fournira un moyen d'analyser l'effet produit par un type donné de matière organique. Il nous est donc désormais possible d'aborder l'étude de substances organiques moins bien définies.

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE FERMENTATION

Les matières organiques qui assurent, dans le sol, l'ensemble complexe de fonctions que nous avons évoquées en introduction et qui règlent en particulier dans une large mesure la stabilité de la structure sont élaborées au cours de phénomènes de fermentation. Ces derniers dépendent du métabolite de départ et des conditions de milieu (aération, richesse minérale, température, humidité... etc.) qui sont elles-mêmes liées au type de sol, aux conditions climatiques et, dans le cas des sols cultivés, aux techniques culturales utilisées.

Dans le milieu naturel, il est difficile d'isoler ces différents facteurs pour en apprécier l'influence particulière. C'est pourquoi nous avons cherché à obtenir, au laboratoire, des échantillons enrichis en matières organiques qui soient le produit de fermentation dirigées en ce qui concerne le métabolite de départ et les conditions dans lesquelles elles se déroulent.

A — Action des agents de la fermentation

Dans une première série d'essais, nous avons cherché à préciser l'influence de la substance même des agents de la fermentation

Certains auteurs parmi lesquels SWABY (1950) et HÉNIN (1944) ont en effet souligné le rôle des gommes et mucilages d'origine bactérienne et des filaments mycéliens qui se développent lorsqu'on ajoute au sol une substance fermentescible dans des conditions autorisant une activité des micro-organismes.

Nous nous sommes inspirés d'une expérience de HÉNIN dans laquelle cet auteur avait utilisé le glucose comme source de carbone. Ce sucre paraissait peu susceptible en lui-même ou dans ses sous-produits de dégradation de modifier les facteurs tels que mouillabilité et cohésion qui commandent, nous l'avons vu, le comportement du sol vis-à-vis de l'eau. Une raison supplémentaire de choisir le glucose nous a été fournie par sa très grande fermentescibilité propre à faciliter l'étude successive des différentes phases de la fermentation dans un laps de temps relativement court.

I. — DESCRIPTION DE L'EXPÉRIENCE

Deux séries d'échantillons composées d'agrégats d'horizon B de diamètre moyen compris entre 0,2 et 2 mm. ont été amenées à une humidité de 25 p. 100 à l'aide d'une solution contenant respectivement du glucose et de l'azote nitrique pour la première série, du glucose seul pour la deuxième série. Les quantités de glucose solubilisé

étaient calculées de façon à ce que chaque échantillon reçoive 2 p. 100 de son poids sec de glucose (soit 8 p. 1 000 de carbone), la quantité d'azote correspondant pour la première série à un rapport C/N égal à 10 pour l'ensemble de l'apport. Ces échantillons ont été introduits dans des flacons bouchés au liège de façon à maintenir un milieu relativement aéré au niveau de la fermentation, le tout étant placé à l'étuve humide à 30° C.

Tous les cinq jours on a extrait de l'étuve un échantillon de chaque série qui a immédiatement fait l'objet d'un examen à la loupe binoculaire dans le but de déceler la présence de champignons ou de colonies d'autres micro-organismes. Après séchage à l'air, nous avons examiné le comportement d'une fine gouttelette d'eau déposée sur l'échantillon pour contrôler directement l'évolution de sa mouillabilité.

Les échantillons ont été ensuite soumis aux différents tests de l'analyse d'agrégats et l'on a dosé le carbone et l'azote organique qu'ils renfermaient.

II. — Évolution des taux de carbone et d'agrégats stables

Les deux graphiques ci-contre (6 et 7) indiquent les variations des taux d'agrégats stables après les deux prétraitements principaux (alcool et benzène) pour chacune des deux séries : avec et sans apport d'azote sous forme nitrique. Nous avons porté sur ces mêmes graphiques l'évolution de la teneur en carbone organique et du rapport C/N au cours de la fermentation. L'examen et la comparaison de ces deux graphiques mettent en évidence un certain nombre de faits :

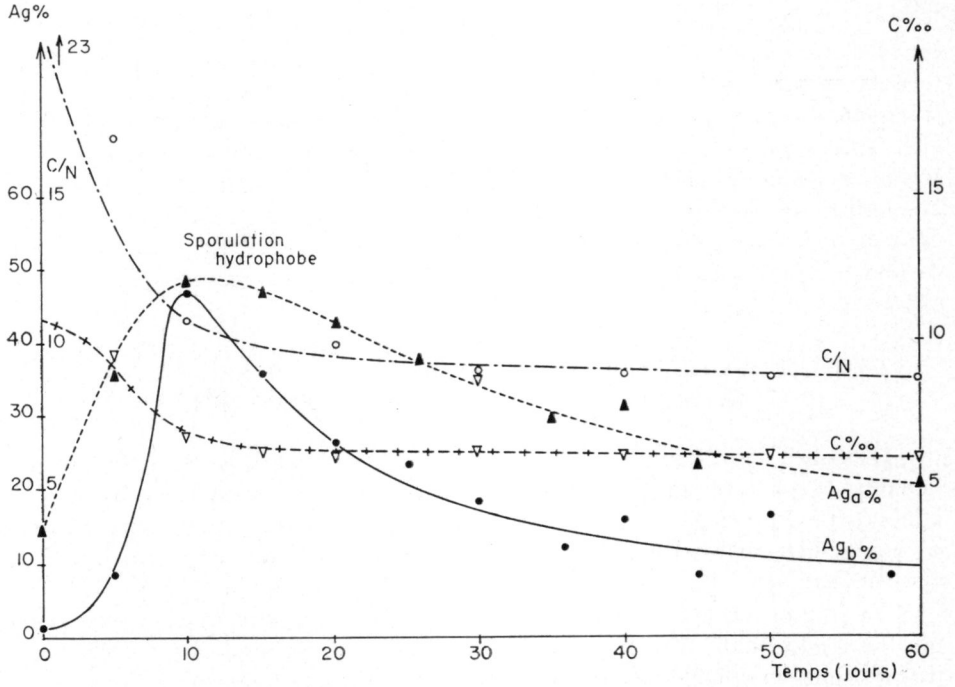
Tout d'abord, on peut constater que l'évolution de la stabilité est liée aux variations de la teneur en carbone organique. Plus précisément, tout accroissement de stabilité correspond à la disparition, provoquée par fermentation, d'une certaine quantité de carbone.

Cette disparition de glucose et les phénomènes qui l'accompagnent ne se produisent pas au même rythme en présence ou en l'absence d'azote nitrique.

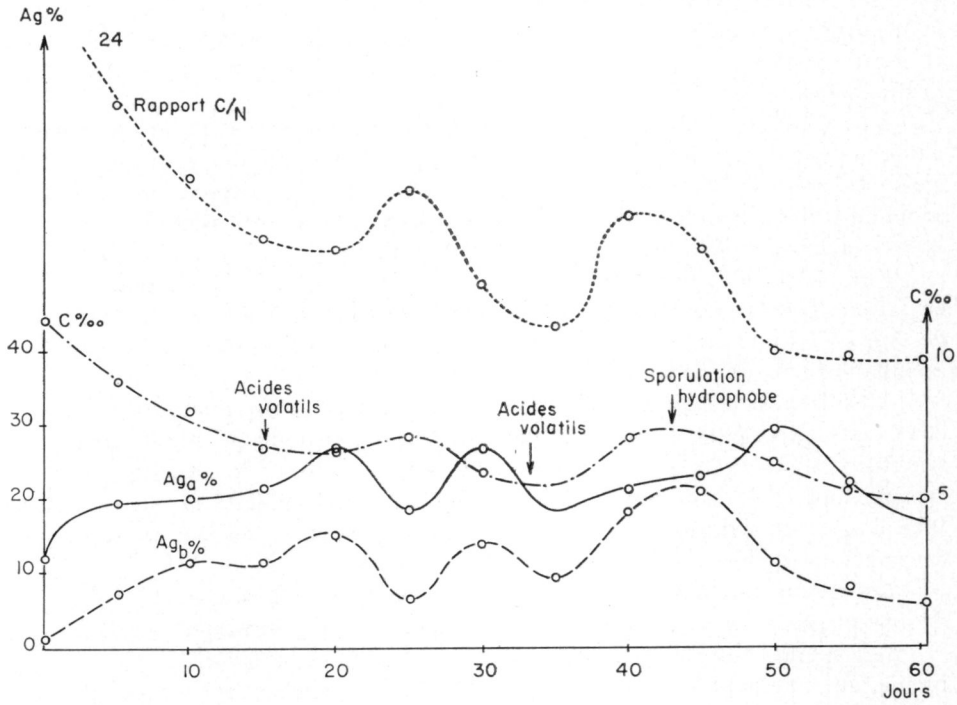
En présence d'azote, le phénomène est extrêmement rapide et régulier : dix jours après le début de la fermentation, le rapport C/N est déjà descendu à une valeur très voisine de 10 aux alentours de laquelle il se maintiendra pendant toute la durée de l'expérience ; à la même époque les 3/4 du carbone apporté ont disparu et la diminution ne sera plus désormais qu'extrêmement lente. L'évolution structurale est à peu près achevée dès ce moment-là.

Par contre, en l'absence d'azote minéral, l'évolution est à la fois plus lente et plus anarchique : c'est seulement à partir du 60e jour que les teneurs en carbone deviennent équivalentes dans les deux séries.

Encore, doit-on noter des anomalies dans l'évolution des teneurs en carbone et corrélativement des rapports C/N en l'absence d'azote. A certaines époques en effet, aux environs des 25e et 40e jours, le milieu semble s'enrichir en carbone. Ce phénomène, évidemment aberrant, paraît être en relation avec le fait que quelques jours avant ces périodes les échantillons ont été le siège de fermentations particulières se manifestant par le dégagement aisément perceptible à l'odorat d'acides volatils. Étant donné que ces derniers et particulièrement l'acide acétique ne sont que partiellement oxydés par le mélange sulfochromique dans les conditions où nous opérons, on peut supposer que les « enrichissements » observés sur certains



GRAPHIQUE 6. — *Évolution d'un sol au cours de la fermentation de glucose en présence d'azote nitrique*



GRAPHIQUE 7. — *Évolution d'un sol au cours de la fermentation de glucose en l'absence d'azote nitrique*

échantillons n'étaient qu'apparents et résultaient d'une appréciation faussée des teneurs en carbone des échantillons antérieurs. Ce point de vue a été confirmé par le dosage des acides volatils dans les différents échantillons en cause. Ce n'est en effet qu'aux périodes précédant immédiatement les « remontées » anormales de la teneur en carbone que les quantités d'acides volatils présentes dans le milieu à l'ouverture des flacons ont été suffisantes pour être dosées. Exprimées en taux de carbone de l'acide acétique elles se sont alors élevées à des valeurs du même ordre de grandeur, soit 1 à 2 p. 100 de carbone, que les variations anormales que nous avons observées.

III. — Relations entre les variations de stabilité et le développement des micro-organismes

L'examen des échantillons à la loupe binoculaire dès leur sortie de l'étuve nous a permis de constater qu'il existait une incidence du développement de champignons à la surface des agrégats sur l'évolution de la stabilité structurale. Cette incidence est particulièrement nette dans les premières phases de la fermentation en présence d'azote nitrique.

Au 5e jour, en effet, les agrégats soumis à une telle fermentation apparaissent revêtus d'abondants filaments mycéliens grisâtres. A ce stade l'échantillon reste parfaitement mouillable même après séchage à l'air : une fine goutte d'eau déposée à sa surface s'étale en effet aussitôt et est rapidement absorbée. Toutefois, si l'on mnoie sous l'objectif un tel agrégat, il se délite beaucoup plus lentement qu'un agrégat non fermenté : sa « cohésion » à l'état humide semble donc plus importante. Parallèlement, le taux d'agrégats stables à l'alcool Ag_a p. 100 atteint 36 p. 100 contre 18 p. 100 pour le témoin, le taux d'agrégats stables au benzène Ag_b p. 100 n'étant que faiblement modifié.

Au 10e jour les champignons ont abondamment sporulé recouvrant les agrégats d'une poussière vert-de-gris qui s'avère extrêmement hydrophobe. Une gouttelette d'eau déposée sur l'échantillon séché, conserve jusqu'à évaporation une forme arrondie Il devient difficile de noyer certains agrégats. A cette période on relève un accroissement considérable d'Ag_b qui atteint 47 p. 100.

Dans le cas de la fermentation sans azote le phénomène est beaucoup moins net en raison du faible développement des micro-organismes. Toutefois l'augmentation de Ag_b p. 100 qui se produit au 40e jour correspond à l'apparition de spores non mouillables à la surface de certains agrégats.

Ainsi la présence et ce stade de développement des champignons sont apparus dans cette expérience comme des facteurs très importants de stabilisation de la structure. L'observation directe permet même de préciser le mécanisme de leur action ; l'interprétation, sur les bases que nous avons établies au chapitre II, des taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool et au benzène vient à l'appui des conclusions tirées :

Les filaments mycéliens emballent l'agrégat dans un réseau lui permettant de mieux résister au délitement : il s'agit alors d'une augmentation de cohésion.

Les spores, ainsi vraisemblablement que certaines gommes d'origine bactérienne, ont une action anti-mouillante. De très faibles quantités de ces substances sont alors capables de provoquer des accroissements considérables de stabilité.

La netteté de ces actions nous a incité à étudier les populations microbiennes présentes dans les échantillons fermentés. Pour cela nous avons procédé à des comptages par la technique des dilutions qui consiste à ensemencer une série de plaques de silicogel avec des broyats de plus en plus dilués de l'échantillon étudié et à déterminer le nombre et la nature des colonies microbiennes apparaissant après un séjour de quelques jours dans une étuve à culture.

Nous avons apprécié les populations présentes au 40e jour dans chacune des séries avec ou sans azote. La comparaison des différentes dilutions n'ayant fait apparaître clairement que l'abondance relative d'*Aspergillus* en présence d'azote nous nous bornerons à présenter globalement les résultats (tabl. 7 *bis*).

TABLEAU 7 *bis*

Populations microbiennes au 40e jour de fermentation

	Série sans azote	Série avec azote
Nombre total de colonies	13	53
Champignons	12 { *Penicillum* 80 % ; *Trichoderma* 10 % ; Dematiées 10 % }	38 { *Aspergillus* 60 % ; Dematiées 15 % ; *Penicillum* 15 % ; Divers 10 % }
Bactéries	1 Bacille	12 { Staphylocoque 40 % ; *Diplococcus* 25 % ; Bacilles 25 % ; Divers 10 % }

Les pourcentages sont donnés en chiffres arrondis aux dizaines et demi-dizaines.

On constate tout d'abord qu'en présence d'azote la microflore est beaucoup plus riche, tant au point de vue de la variété des genres que de l'abondance des germes.

Dans l'échantillon fermenté sans azote on ne trouve pratiquement que des champignons qui appartiennent presque tous au genre *Penicillium*. Au contraire l'échantillon fermenté avec azote contient également de nombreuses colonies de bactéries et les champignons qu'il renferme sont plus divers, bien que le genre *Aspergillus* prédomine ; un ensemencement d'un milieu de culture avec les spores apparues au 10e jour nous permet, de plus, de penser que ce sont des *Aspergillus* qui ont été responsables de la « pointe » de stabilité observée à cette époque.

Enfin, on doit souligner que, dans les deux séries, les champignons les plus fréquents appartiennent à des genres couramment représentés dans le sol en conditions naturelles, et qu'ils y sont peu spécifiques d'une source de carbone déterminée. Il est donc probable que la comparaison reste valable lors de l'enfouissement de matières organiques diverses dans les conditions de la pratique agricole.

Ce premier groupe d'expériences semble mettre clairement en évidence l'importance, déjà soulignée par différents auteurs, des corps microbiens agents de l'évolution des matières organiques dans le sol et cela indépendamment des produits de métabolisme qu'ils élaborent au cours de leur action. De plus, les conditions de milieu apparaissent comme jouant un rôle déterminant parce qu'elles influencent à la fois la qualité, l'importance numérique et le rythme de développement des micro-organismes qui jouent ce rôle de stabilisateur de la structure. Il est bien évident que cette action directe de la microflore est d'autant plus sensible qu'elle est, comme c'était le cas dans les fermentations à partir de glucose que nous avons décrites, pratiquement la seule à se manifester par suite de l'absence ou de la faible importance de produits d'évolution organiques issus de ces fermentations. Il semble que l'action des engrais verts, très controversée en ce qui concerne une amélioration de stabilité structurale, puisse être rattachée à cette catégorie de phénomènes. Nous verrons, dans la deuxième partie de ce mémoire que cette hypothèse est assez raisonnable et qu'en particulier, elle permet d'expliquer un certain nombre de bénéfices tirés de l'application de cette technique culturale.

B. Stabilisation due à la fermentation de produits végétaux

Après avoir mis en évidence le rôle propre des micro-organismes responsables des fermentations, il nous reste à étudier l'influence des produits de la fermentation.

I. — ESSAI DE DURÉE DE FERMENTATION A PARTIR DE FOIN DE LUZERNE

Dans une première expérience inspirée des essais « glucose » mais où ce sucre a été remplacé par de la farine de foin de luzerne (3,75 g pour 100 g de terre sèche), nous avons cherché à analyser le mécanisme de la fixation au sol des produits formés à différentes périodes de la fermentation. Nous avons appliqué dans ce but à des échantillons ayant fermenté pendant des temps croissants la technique précédemment décrite de fractionnement densimétrique des matières organiques. Les résultats ainsi obtenus ainsi que les stabilités structurales exprimées en taux d'agrégats stables au benzène sont présentés dans le graphique 8.

On constate que la liaison de substances organiques nouvelles à la partie minérale du sol se manifeste dès le 10e jour. L'évolution très rapide au début se ralentit à partir du 20e au 30e jour.

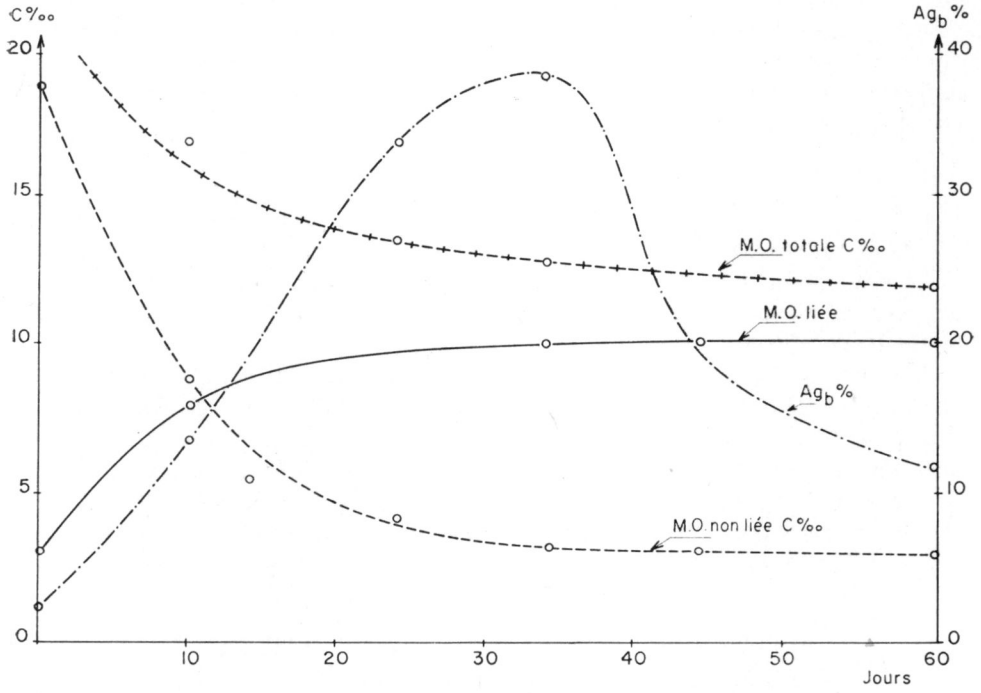
D'autre part le rendement de la transformation de la matière organique libre apportée en matière organique liée est relativement important pour l'ensemble de la période étudiée. En effet à la dispartition de 16 p. 1 000 de carbone sous forme libre correspond une augmentation de 7 p. 1 000 de carbone sous forme liée soit un rendement de 45 p. 100 environ. Compte tenu de cette valeur et de la durée de notre expérience, nous avons tout lieu de penser que les matières liées ainsi fixées sont pour la plupart d'entre elles des produits préhumiques, donc transitoires.

Nous en aurons confirmation plus loin (voir p. 388).

Parallèlement à cette évolution, les modifications de stabilité structurale

(Ag_b p. 100) sont sensibles dès le 10e jour. Le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène croît jusque vers le 10e jour où l'on atteint des valeurs de Ag_b proches de 40 p. 100. Cette date correspond par ailleurs au ralentissement de la liaison des matières organiques, et vraisemblablement à la fin d'un premier cycle de développement des micro-organismes. En effet dans les semaines suivantes, la teneur en agrégats stables décroît jusqu'à des valeurs de 26 p. 100 environ. Pendant la durée de notre expérience il semblait qu'un palier était atteint.

Si maintenant nous examinons plus précisément la relation entre la matière organique liée et le taux d'agrégats stables Ag_b nous constatons qu'au 60e jour 7 p. 1000 de carbone nouvellement lié ont provoqué un accroissement de 15 à 20 p. 100 d'agrégats stables alors que au 30e jour la fixation d'une quantité inférieure de carbone avait assuré la stabilisation de près de 40 p. 100 de Ag_b supplémentaires.



GRAPHIQUE 8. —*Évolution d'un sol au cours de la fermentation de farine de foin de Luzerne*

On peut interpréter cette différence en supposant qu'au 15e jour, la stabilité est assurée simultanément par des produits de dégradation de la luzerne et par des corps microbiens hydrophobes. Ces derniers peuvent être progressivement détruits entre le 30e et le 60e jour par de nouveaux micro-organismes ne possédant pas des propriétés aussi marquées vis-à-vis de l'eau. SWABY a déjà signalé l'existence de telles successions dans les populations de micro-organismes et nous avons vu ici même dans le cas du glucose que la stabilisation par les corps microbiens n'était pas durable. Lorsque l'action intense mais éphémère des corps microbiens s'est atténuée on peut considérer que les produits de la fermentation sont responsables de la plus grande part de la stabilité restante.

Si cette hypothèse est fondée il est probable que bien que de plus en plus lente l'évolution de ces produits transitoires vers l'humus se poursuit provoquant ainsi une diminution progressive de la stabilité du sol. C'est effectivement ce que l'on peut constater, nous le verrons, lorsqu'on étudie des essais de longue durée comportant l'enfouissement au champ de foin de luzerne.

En conclusion, lorsqu'on passe d'une source de carbone telle que le glucose peu susceptible de fournir des sous-produits de fermentation actifs vis-à-vis de la stabilité du sol à des matières organiques fermentescibles plus complexes et dont la dégradation microbienne conduit à la formation de substances susceptibles de modifier le comportement du sol vis-à-vis de l'eau, on conserve les grandes lignes du phénomène. Toutefois, deux facteurs au lieu d'un seul se manifestent alors : ce sont d'abord les micro-organismes eux-mêmes dont l'action brutale mais éphémère suit de très près l'incorporation ; ce sont, dans un deuxième temps, les produits d'évolution, pour la plupart transitoires, dont l'action spécifique est plus faible, mais aussi plus durable. C'est donc dans cette deuxième phase que nous nous placerons pour comparer à un moment donné le rôle des produits de fermentations formés et fixés au sol dans diverses conditions.

II. — Essais de fermentation en tubes

Pour préciser ces conditions d'efficacité des produits préhumiques dont l'essai précédent a mis en évidence l'influence sur la stabilité structurale, nous avons adopté une technique expérimentale appropriée à l'étude séparée au laboratoire de quelques facteurs principaux.

Le dispositif devait nous permettre de faire varier la nature du matériel végétal apporté et les conditions d'aération de la fermentation. Nous avons également cherché à pouvoir juger séparément l'efficacité des produits immédiatement fixés au sol à leur point de formation et celle des produits ayant migré. Enfin il nous fallait obtenir pour chaque catégorie une gamme de teneurs en carbone lié suffisamment progressive et étendue pour permettre la recherche des relations quantitatives entre la concentration en produit et les répercussions sur les différentes formes de stabilité.

Mode opératoire

Des agrégats de l'horizon B de Versailles calibrés de 0,2 à 2 mm constituent le support minéral. Des tubes de 5 cm de diamètre, et d'une vingtaine de cm de hauteur, dont l'ouverture inférieure est obturée par une étamine de nylon surmontée d'un lit de graviers de 1 cm d'épaisseur sont remplis pour moitié avec le mélange opéré à sec d'agrégats d'horizon B et de la quantité choisie (variant de 2 à 10 p. 100 pour chaque type) d'une farine végétale déterminée et pour moitié d'agrégats d'horizon B purs. La colonne est alors imbibée d'eau par capillarité de façon à obtenir une humidification complète avec une destruction minime des agrégats.

Lorsqu'on désire que la fermentation ait lieu en milieu aérobie, le mélange horizon B-farine végétale est disposé dans la partie supérieure du tube et repose sur une colonne de hauteur équivalente d'horizon B pur. L'humidification terminée, le tube est suspendu à un support de façon à ce que son drainage s'effectue librement puis il est gardé dans une pièce à température constante. Son poids est apprécié

aussitôt après la fin du drainage et maintenu constant par des apports d'eau quotidiens à la partie supérieure du tube. Cette dernière est obturée par un tampon humide d'éponge de manière à éviter toute évaporation au niveau supérieur du tube. Cette évaporation a lieu par contre d'une façon intense en raison de la température élevée (25°) et de la ventilation dans l'enceinte de fermentation, au niveau de la toile de nylon qui supporte la colonne de terre. Dans ces conditions, un milieu aérobie prévaut dans l'ensemble de la colonne de terre. Dans la moitié supérieure du tube prennent naissance des substances dont une partie se fixe aux particules de terre qui sont immédiatement à leur contact au moment de leur formation. La percolation de l'eau apportée quotidiennement pour compenser les pertes par évaporation entraîne les substances les plus mobiles vers la partie inférieure du tube où se trouvent des agrégats d'horizon B sur lesquels elles se fixent. Le demi-tube inférieur se trouve donc enrichi en produits capables de migrer qui se fixent en quantités variables suivant la cote des agrégats considérés (distance au front d'évaporation et à la source de substances mobiles).

Lorsqu'on désire que la fermentation ait lieu en milieu anaérobie, le mélange horizon B-matière organique est déposé dans le fond du tube directement au-dessus de la toile de nylon ; la colonne d'horizon B pur occupe alors la partie supérieure du tube. Après imbibition capillaire dans les mêmes conditions que précédemment, chaque tube est déposé dans un récipient empli d'eau de façon à ce que le niveau y atteigne la limite supérieure de la colonne de mélange horizon B-matière organique qui se trouve ainsi entièrement saturée d'eau. Dans l'enceinte de fermentation, chaude et ventilée, une évaporation assez intense se produit au niveau supérieur du tube. Cette perte est compensée par la remontée capillaire, à travers le tube, de l'eau en réserve dans le récipient dont le niveau est maintenu constant par des additions quotidiennes. On voit que par un processus analogue à celui qui se produit dans les tubes aérobies il y a transport de la zone de fermentation vers la colonne d'horizon B pur d'une partie des produits mobiles.

On aboutit ainsi, après un délai de quelques semaines et dépotage des tubes par tranches successives, à la constitution d'une série d'échantillons contenant, les uns un reste de matière organique libre et les produits qui se sont fixés sur place, les autres des quantités variables des produits d'imprégnation. Suivant les cas la fermentation a eu lieu en milieu aérobie ou en milieu anaérobie.

Dans tous les cas l'expérience a été poursuivie pendant deux mois et demi, c'est-à-dire suffisamment pour que la période initiale d'action brutale des microorganismes soit dépassée (voir p. 367) et que l'on ait principalement affaire à l'action des produits de la décomposition.

Les échantillons ont été débarrassés, par fractionnement densimétrique, des résidus non fixés de la fermentation et soumis à une série de mesures portant sur les taux de carbone organique lié et d'agrégats stables après les différents prétraitements classiques de l'analyse d'agrégats.

En résumé, les divers échantillons obtenus présentent les caractéristiques résultant de la combinaison des différents facteurs suivants :

Nature du matériel végétal.

Nous avons opéré à partir de farine de luzerne caractérisée par la finesse de sa granulométrie et sa relative richesse en azote (C/N = 15), de farine de paille de blé,

beaucoup plus grossière et de C/N élevé, et de farine de paille d'avoine voisine du blé pour le C/N et intermédiaire entre la luzerne et le blé quant à la finesse.

Conditions d'aération.

Rappelons que la matière organique pouvait être placée dans des conditions d'anaérobiose strictes (immersion dans de l'eau) ou d'aérobiose, l'humidité du sol étant alors maintenue à un niveau voisin de la capacité au champ. Dans tous les cas les produits de migration ce sont déposés en milieu aéré.

La solubilité des produits de décomposition.

Nous avons pu étudier séparément l'action sur la terre, au niveau même des matières végétales, des substances fixées sur place qui comprenaient essentiellement des corps microbiens et des produits pré-humiques ou humiques faiblement solubles ou insolubles ; en effet, la circulation de l'eau a été telle, à ce niveau, tout au long de l'expérience, que l'on peut admettre que la grande majorité des produits solubles a été entraînée. Ces derniers, en se déposant, en conditions aérobies dans tous les cas sur d'autres particules d'horizon B, nous ont fourni une gamme d'échantillons plus ou moins enrichis en matières toujours solubles au départ mais formées dans des conditions d'aération différentes. Nous désignerons par « produits de transport » ou d'« imprégnation » les substances ayant ainsi migré et par « produits fixés sur place » les substances du premier type.

Teneur en produits de décomposition.

Suivant la quantité de matière végétale incorporée, sa nature, les conditions de fermentation, la distance des particules enrichies au lieu de formation des produits de transport et à la surface d'évaporation, les teneurs en carbone ont été suffisamment différentes (4 à 20 p. 1 000) pour nous fournir une gamme d'échantillons permettant d'établir des relations statistiques entre la concentration en produits et ses répercussions sur les différentes formes de stabilité.

Nous étudierons successivement ces différents points tout en soulignant qu'il s'agit là d'une division quelque peu arbitraire si l'on envisage la transposition des résultats dans le milieu naturel où dans la plupart des cas il y a succession dans le temps ou juxtaposition des diverses conditions que la nécessité d'une analyse des phénomènes nous a contraint d'isoler.

Comparaison des différentes matières végétales incorporées

Une telle étude doit porter sur deux aspects des phénomènes survenus au cours de la fermentation.

Tout d'abord, nous avons comparé la quantité de substances fixées au sol au bout d'un temps déterminé et à partir d'un apport donné de matière sèche végétale.

Le tableau 8 présente les résultats moyens obtenus à partir d'apports de matières végétales correspondant à 10 p. 100 de la masse de terre.

On constate que la quantité de substances formées à partir de la luzerne est sensiblement plus élevée que les quantités formées à partir des parties de blé ou d'avoine. Le rapport C/N de l'apport organique semble donc être le facteur déter-

minant de l'intensité de l'évolution au moins dans les conditions où nous nous trouvons, c'est-à-dire dans le cas d'un sol pratiquement dépourvu d'azote minéral.

Par contre la finesse relative de la farine de paille d'avoine ne semble pas avoir permis une décomposition supplémentaire par rapport au blé.

TABLEAU 8

Comparaison des teneurs moyennes en carbone lié (C °/oo) suivant la nature de la matière végétale apportée

		Témoin	Luzerne	Blé	Avoine
Produits fixés sur place	aérobiose	3,8	17,1	9,1	11,8
	anaérobiose	3,9	16,2	7,2	6,9
Produits de transport	aérobiose	4,0	8,0	5,0	4,9
	anaérobiose	3,9	8,7	5,2	4,8

Ces conclusions semblent valables aussi bien pour les produits de transport que pour les produits fixés sur place et cela quelles que soient les conditions de fermentation.

Le deuxième point de cette étude a porté sur l'efficacité spécifique des produits formés à partir des différentes matières végétales incorporées.

Sans préjuger de la loi régissant les rapports entre la teneur en carbone et la stabilité nous avons comparé les taux d'agrégats stables obtenus à partir d'échantillons présentant des teneurs en carbone lié comparables mais provenant de la décomposition des trois matières végétales étudiées (tabl. 9.)

TABLEAU 9

Comparaison de l'efficacité des substances issues de matières végétales différentes
(Produits fixés sur place)

Condition de fermentation	Matière végétale	C lié ‰	Ag_a	Ag_b
Anaérobiose	luzerne	7,45	38	52
	blé	7,25	40	51,4
	blé	5,5	24	32,6
	avoine	5,6	28,2	33,2
Aérobiose	luzerne	10	56	74
	blé	9,2	49	70,4
	avoine	9,5	55	69
Témoin sans matière organique		3,8	16	3,0

Il ressort de ces résultats que pour des conditions données d'aération de la fermentation, les produits issus des trois matières végétales étudiées ont une action spécifique tout à fait comparable.

Par ailleurs en supposant cette conclusion acquise c'est-à-dire en admettant qu'il est licite de considérer comme une seule population et donc de confondre sur un même graphique les points représentatifs de la teneur en carbone et de la stabilité de structure des divers essais quelle que soit la substance incorporée au départ, nous avons constaté que ces points se situaient autour de la courbe représentative de la fonction de régression lorsque celle-ci existe sans que la nature de matériel végétal se manifeste.

Il n'en reste évidemment pas moins que la stabilisation obtenue sera très variable en raison des différences d'intensité de la décomposition des matières organiques apportées, différences que le tableau 8 a nettement mises en évidence.

Étude de la stabilisation par les substances organiques fixées sur place

Notre méthode a consisté à rechercher les liaisons pouvant exister entre la teneur en carbone organique lié et les taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique ou au benzène des différents échantillons.

Dans ce cadre, nous avons abordé séparément l'étude des substances formées en milieu aérobie et celle des substances formées en milieu anaérobie ; mais conformément à la conclusion énoncée plus haut, nous avons traité simultanément de l'action de ces substances quelle que soit leur origine végétale.

a) *Stabilité après prétraitement à l'alcool.*

Les graphiques 9 et 10 montrent l'allure de la relation entre la teneur en carbone lié des échantillons et leur taux d'agrégats stables à l'alcool dans les deux conditions de fermentation (aérobiose et anaérobiose). Rappelons que les variations du taux d'agrégats stables à l'alcool Ag_a p. 100 peuvent être interprétées comme reflétant les variations de « cohésion » des échantillons à l'état humide.

Le calcul statistique a permis de calculer entre ces deux séries de données des régressions linéraires d'équation :

en milieu aérobie	$y = 2{,}66\ x + 23{,}6$	(P = 1 p. 100)
en milieu anaérobie ..	$y = 4{,}8\ x + 1{,}3$	(P = 10 p. 100)

dans lesquelles y représente le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique et x la teneur en substances fixées exprimée en C p. 1 000. On constate que seule la première de ces régression à une signification statistique.

L'examen direct des graphiques fait cependant apparaître que les deux nuages de points ne diffèrent sensiblement que pour les valeurs de x inférieures à 7 p. 1 000. Nous avons alors calculé les régressions pour les valeurs de x supérieures à ce seuil :

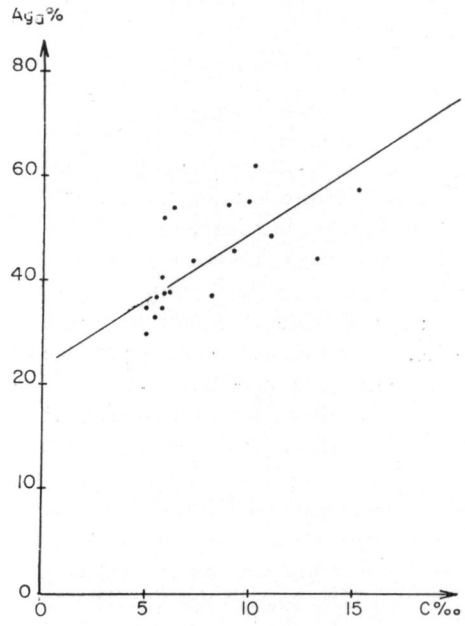
milieu aérobie	$y = 2{,}48\ x + 24{,}9$	(P = 1 p. 100)
milieu anaérobie	$y = 3{,}2\ x + 19{,}8$	(P = 1 p. 100)

qui sont l'une et l'autre significatives.

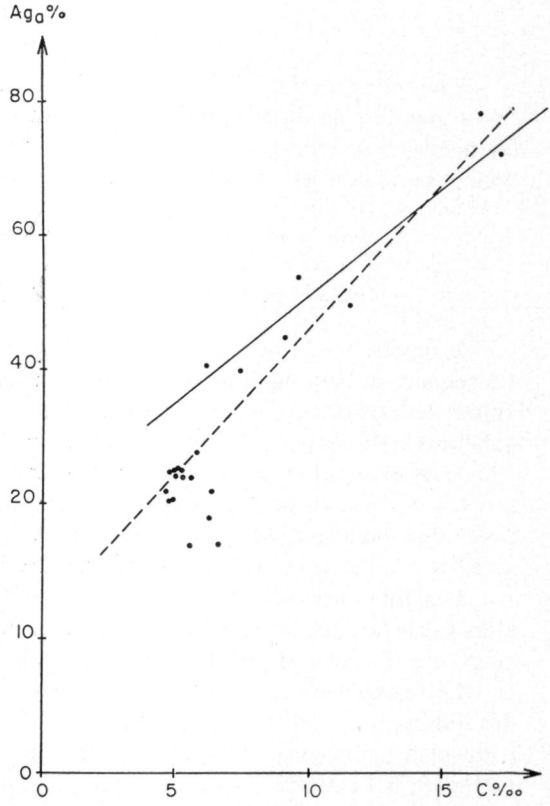
L'ensemble de ces résultats peut alors être interprété de la façon suivante :

Pour les valeurs de x inférieures à 7 p. 1 000, qui correspondent à la fixation de

faibles quantités de substances la cohésion de la terre humide, reflétée par le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool, dépend étroitement des conditions physiques dans lesquels se sont trouvées les tranches de sol correspondantes au cours de l'expérience. Ces conditions ont été évidemment beaucoup plus sévères en milieu anaérobie gorgé d'eau. Effectivement, pour l'ensemble des échantillons faiblement enrichis en milieu anaérobie le taux Ag_a p. 100 est en moyenne de 23 p. 100 pour 5,48 p. 1 000 de carbone en milieu anaérobie tandis qu'il s'élève à 41 p. 100 pour



GRAPHIQUE 9. — *Action des produits fixés sur place sur la cohésion de la terre humide. Conditions aérobies*



GRAPHIQUE 10. — *Action des produits fixés sur place sur la cohésion de la terre humide. Conditions anaérobies*

une teneur moyenne en carbone équivalente à la précédente (5,6 p. 1 000) en milieu aérobie.

Par contre, pour les quantités de substances fixées supérieures à un seuil correspondant à 7 p. 1 000 de carbone l'allure de la variation de Ag_a p. 100 en fonction de la teneur en matières organiques liées est comparable, aussi bien en ce qui concerne la pente que l'ordonnée à l'origine ($x = 7$) de la droite de régression, quelles que soient les conditions de fermentation. Ce phénomène d'accroissement de cohésion est dans les deux cas de faible intensité, chaque unité p. 1 000 supplémentaire de carbone fixée ne provoquant qu'une augmentation moyenne d'environ 3 p. 100 d'Ag_a.

b) *Stabilité après prétraitement au benzène.*

Les relations entre la teneur en carbone et le taux d'agrégats stables au benzène (Ag_b p. cent (graph. 11 et 12) apparaissent fort différentes des précédentes. Ce résultat était prévisible étant donné que les variations d'Ag_b p. 100 traduisent celles de la mouillabilité et non plus celles de la cohésion des agrégats.

La position des points expérimentaux correspondant à l'une et l'autre conditions de fermentation nous a incité à rechercher une relation de régression de la forme générale :

$$y = \lambda e^{-\left(\frac{\mu}{x}\right)^n}$$

Une telle fonction répondait en effet à un certain nombre d'exigences évidentes telles que de passer par l'origine et de tendre vers une valeur asymptotique lorsque x augmente indéfiniment. Le calcul des paramètres correspondant au meilleur ajustement possible à cette fonction a permis d'écrire les équations de régression suivantes :

milieu aérobie $\quad y = 98{,}6\, e^{-\left(\frac{7{,}0}{x}\right)^3} \quad P = 0{,}1$ p. 100

milieu anaérobie $\quad y = 91{,}2\, e^{-\left(\frac{6{,}1}{x}\right)^4} \quad P = 0{,}1$ p. 100

λ représente la limite vers laquelle tend le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène lorsque la teneur en carbone de l'échantillon augmente. Cette valeur devrait théoriquement être égale à 100 puisque les tubes ont été remplis d'agrégats tous supérieurs à 0,2 mm. qui est la limite retenue pour le tamisage sous l'eau.

Mais ce maximum ne pourrait être atteint que si au cours de la fermentation, il n'y avait pas eu de dégradation structurale. En fait les valeurs numériques de λ tirées des équations de regressions sont légèrement plus faibles, ce qui peut être attribué à la destruction d'une partie des agrégats au cours de la mise en fermentation.

Les différences observées suivant les conditions de fermentation s'expliqueraient alors par le fait que la dégradation a été plus importante en milieu anaérobie ($\lambda = 91{,}2$) gorgé d'eau, qu'en milieu aérobie ($\lambda = 98{,}6$)

Cette explication, malgré son caractère hypothétique, rend parfaitement compte des différentes conditions de l'expérience. L'interprétation de μ et de n serait beaucoup plus hasardeuse et nous nous bornerons à supposer que ces paramètres sont rattachés à l'activité spécifique des 2 groupes de matières organiques étudiées et à la nature du support minéral.

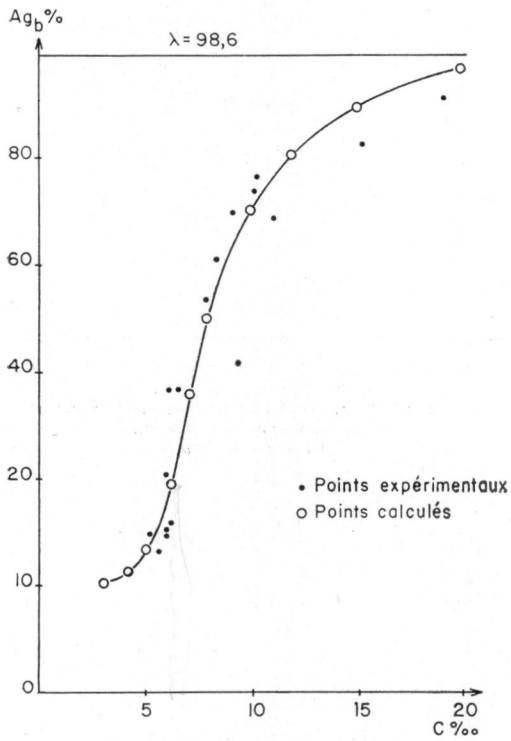
En fait la fonction, rappelons-le, est issue d'un ajustement statistique ; elle ne semble pas avoir une signification physique simple.

c) *Comparaison des stabilités après prétraitement alcool et benzène.*

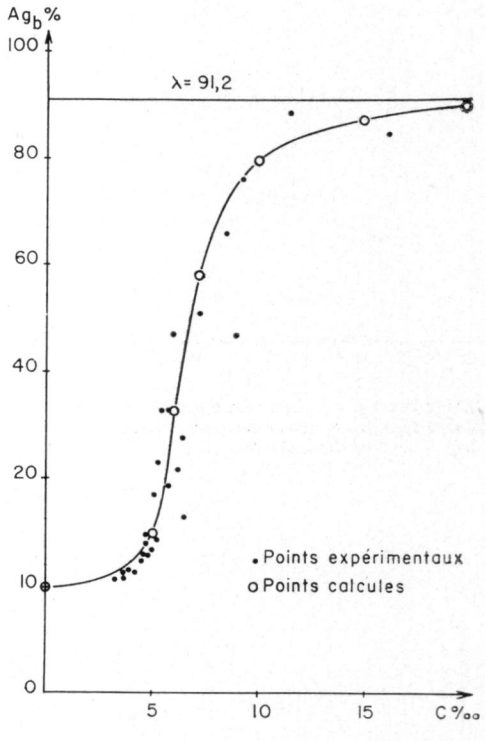
Nous avons par ailleurs cherché à comparer les activités spécifiques des substances fixées sur place d'une part sur la cohésion de la terre humide (Ag_a p. 100) et d'autre part sur la mouillabilité du sol (Ag_b p. 100).

On constate tout d'abord que contrairement à ce qui se passe pour le taux Ag_a p. 100, Ag_b p. 100 est lui modifié par la fixation de très faibles quantités de substances. Ceci est à relier aux modifications de mouillabilité que l'on peut obtenir avec des quantités très petites de substances hydrophobes (S. HÉNIN). La répartition et le mode de fixation de ces dernières jouent alors un rôle déterminant.

D'autre part, si comme cela paraît une approximation raisonnable, nous assimilons à des segments de droite les parties des courbes exponentielles précédentes correspondant aux teneurs en carbone comprises entre 5 et 10 p. 1 000, nous constatons que ces segments ont des pentes voisines de 17 pour les produits anaérobies et de 13 pour les produits aérobies. Ces deux valeurs qui mesurent l'activité spécifique des substances fixées sur la mouillabilité du sol sont donc 4 à 6 fois plus élevées que celles qui expriment l'activité spécifique des mêmes substances, fixées en quantité équivalente, sur la cohésion de la terre humide.



GRAPHIQUE 11. — *Action des produits fixés sur place sur la mouillabilité du sol. Conditions aérobies*

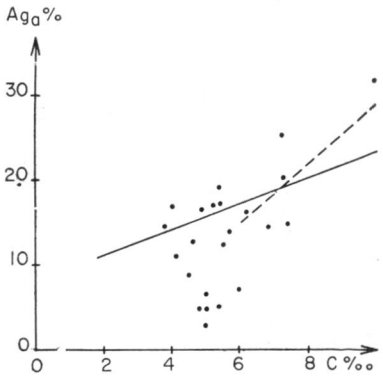


GRAPHIQUE 12. — *Action des produits fixés sur place sur la mouillabilité du sol. Conditions anaérobies*

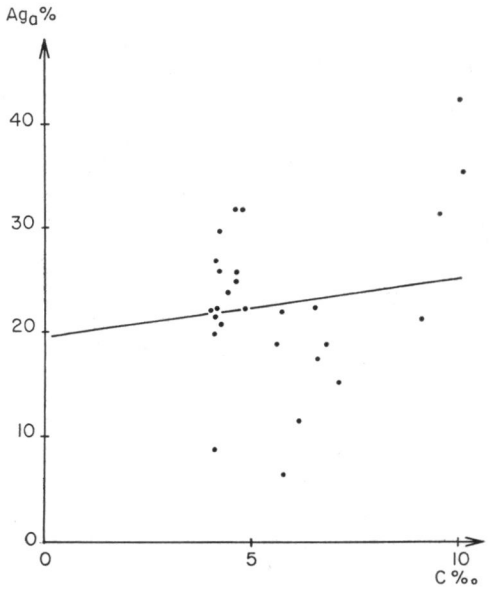
Stabilisation par les produits dits de « transport » ou d'« imprégnation »

Rappelons qu'il s'agit de substances qui après s'être formées dans la partie du tube ayant reçu un apport de matières libres ont migré avant de venir imprégner des agrégats d'horizon B pur.

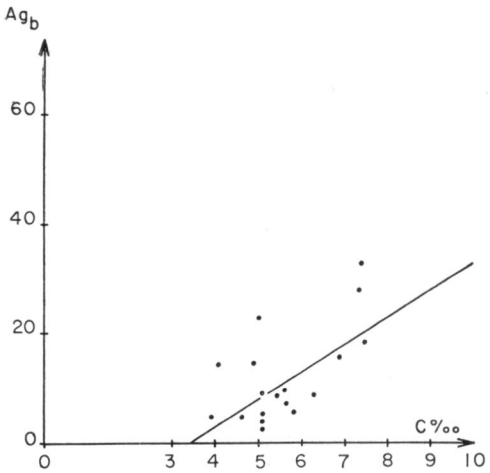
Nous ferons la même distinction que dans le paragraphe précédent suivant que ces substances se sont formées dans des conditions d'aérobiose ou au contraire en l'absence d'oxygène. D'une façon générale, les teneurs en carbone organique ne sont jamais très élevées et il s'ensuit que la gamme des variations sera moins étendue que dans le cas des produits fixés sur place ; ceci rendra plus difficile l'établissement de coefficients d'activité établis à partir de fonctions de régression.



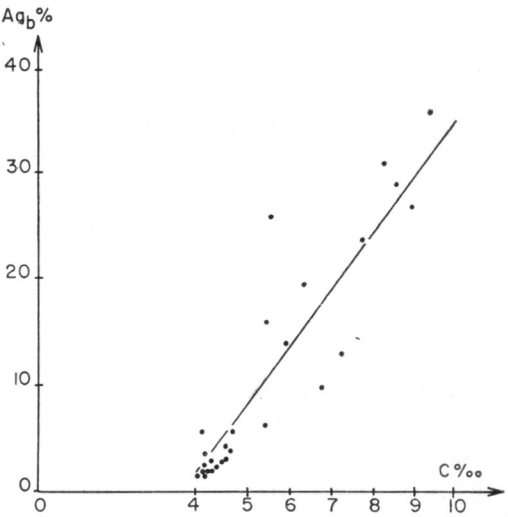
GRAPHIQUE 13. — *Action des produits de transport sur la cohésion de la terre humide. Conditions aérobies*



GRAPHIQUE 14. — *Action des produits de transport sur la cohésion de la terre humide. Conditions anaérobies*



GRAPHIQUE 15. — *Action des produits de transport sur la mouillabilité du sol. Conditions aérobies*



GRAPHIQUE 16. — *Action des produits de transport sur la mouillabilité du sol. Conditions anaérobies*

a) *Action sur la cohésion* (Ag_a)

En milieu aérobie. — L'action des produits d'imprégnation sur la cohésion présente, pour l'ensemble des teneurs en carbone, une faible intensité qui se traduit par une pente de la droite de régression égale à 1,46. Cette régression linéaire d'équation

$$y = 1{,}46\,x + 8{,}44 \qquad (P = 10 \text{ p. } 100)$$

n'est d'ailleurs significative qu'au seuil P = 10 p. 100 c'est-à-dire qu'on ne peut la considérer que comme plausible. Si, compte tenu de l'observation faite au sujet des produits insolubles nous retenons seulement les valeurs de x supérieures ou égales à 7 p. 1 000, la régression devient :

$$y = 3{,}49\,x - 6$$

significative au seuil P = 5 p. 100. L'action des produits de transport issus de fermentations aérobies sur les agrégats qu'ils imprégnent et sur leur cohésion est donc du même ordre de grandeur que celle que nous avions relevée pour les produits fixés sur place.

Dans les conditions d'anaérobiose. — La stabilisation conserve le même caractère. La régression, calculée pour l'ensemble des teneurs en carbone, entre ces dernières et les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène ;

$$y = 0{,}55\,x + 19{,}9,$$

n'est pas significative. Si l'on considère que la presque totalité des teneurs en carbone des échantillons intéressés sont inférieures à 7 p. 1 000 on peut y voir la confirmation d'une conclusion précédente : cette teneur en carbone représente approximativement un seuil pour l'action sur la cohésion de l'horizon B humide de tous les produits quelles que soient leur solubilité et les conditions dans lesquelles ils ont pris naissance.

b) *Action sur la mouillabilité* (Ag_b)

Par contre en ce qui concerne l'influence des substances d'imprégnation sur l'affinité du sol pour l'eau exprimée en Ag_b p. 100 on constate une forte différence entre les divers produits selon qu'ils se sont formés en milieu aérobie ou en milieu anaérobie. Dans le premier cas, la pente de la droite de régression du taux d'agrégats stables après prétraitements benzène en teneur en carbone organique

$$y = 2{,}42\,x - 6{,}51$$

significative au seul P = 0,1 p. 100, est relativement faible.

Dans le deuxième cas, l'équation de régression devient

$$y = 5{,}51\,x - 19{,}4$$

significative au seuil P = 0,1 p. 100. L'interprétation de cette différence considérable d'activité entre ces produits semble devoir être rattachée aux propriétés des complexes organoferriques. Bétrémieux (1951) a en effet montré qu'en milieu anaérobie la migration du fer dans le sol se faisait sous forme de complexes organo-ferreux solubles qui précipitaient sous forme de complexes organo-ferriques en milieu oxydant. Il semble donc que ce soit les propriétés hydrophobes de ces derniers qui

provoquent une stabilisation des agrégats imprégnés par les produits formés en milieu anaérobie tandis que l'action des produits issus de fermentation aérobie ne serait due qu'aux matières organiques seules.

Nous trouverons plus loin (p. 390) une confirmation de ce rôle joué par le fer combiné aux substances organiques, dans la diminution de l'affinité du sol pour l'eau. Notons dès à présent que certains sols humifères et imprégnés d'oxyde de fer par suite de leur inondation prolongée au cours de l'hiver manifestent une hydrophobie extrême allant jusqu'à poser de sérieux problèmes culturaux dès qu'ils sont aérés et séchés au printemps.

Conclusions

1° Ces essais indiquent que la vitesse d'évolution des matières organiques qui s'exprime par la proportion de substance liée dans un temps donné est essentiellement fonction de la teneur en azote du matériel initial. C'est du moins ce qui apparaît quand on compare l'évolution des essais avec introduction de luzerne de de farine de céréales dans un milieu pauvre en azote.

2° L'homogénéité de la relation teneur en matières organiques liées-agrégats stables montre que *dans la limite de précision des expériences* les substances obtenues n'ont pas d'effet spécifique du matériel végétal qui est à leur origine.

Ceci conduit à dire que si l'introduction de luzerne suivie de fermentation accroît davantage le pourcentage d'agrégats stables, la différence tient à la plus grande proportion de matières organiques fransformée et fixée à partir de la luzerne et non à un effet spécifique supérieur de celle-ci.

3° Il n'y a pas de différence importante entre les actions des divers produits de fermentation sur la cohésion du sol évaluée par le taux d'agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique. L'activité de l'ensemble des substances étudiées, à cet égard, n'est sensible que pour des teneurs en carbone supérieures à un seuil que l'on peut supposer être fonction des propriétés du support minéral. Au-delà de ce seuil cette activité est modérée dans tous les cas.

Notons enfin que l'existence d'un tel seuil restreint considérablement les possibilités d'interprétation. En effet la relation Ag_a — C p. 1 000 n'existe que pour des échantillons dont la mouillabilité est déjà fortement réduite. Il devient alors difficile d'admettre *a priori* que le résultat du prétraitement à l'alcool éthylique est indépendant de la mouillabilité du sol (voir p. 356).

4° Le principal mécanisme de stabilisation consiste en une diminution de la mouillabilité du sol. Ce phénomène se produit dès la fixation des plus faibles doses de carbone ; mesuré par l'accroissement du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène, il présente une grande intensité.

La solubilité des produits formés et les conditions de fermentation interviennent dans ces modifications de mouillabilité du sol.

Ce sont ces produits fixés sur place qui présentent l'action spécifique la plus importante et, à ce niveau, c'est en milieu anaérobie que la stabilisation maxima est le plus vite atteinte.

Cette influence des conditions de formation des substances est cependant beaucoup plus spectaculaire encore sur l'action des produits d'imprégnation. Cette dernière, en moyenne moins forte que la précédente, passe en effet du simple à plus du

double lorsqu'on passe de substances formées en milieu aérobie à des substances formées en milieu anaérobie.

5° Le rôle du fer, que l'on peut invoquer pour expliquer cette différence, est confirmé par les résultats d'une expérience annexe où les matières végétales ont été apportées au-dessus du sol à la partie supérieure du tube, l'ensemble de la colonne de sol restant aéré. Il n'a pas été possible dans ces conditions de dégager une relation entre les quantités de carbone fixées par le sol représentant les produits solubles issus de ce « *mulch* » et un accroissement quel qu'il soit de stabilité. L'interprétation la plus immédiate de cette particularité pourrait être fournie en supposant que les fermentations se produisant en dehors du sol et en milieu aéré n'entraînent pas de solubilisation du fer, qui confère ultérieurement aux produits fixés leur stabilité de liaison et leur caractère hydrophobe. Bien que cette conclusion doive être encore considérée comme hypothétique, nous avons fourni en sa faveur quelques arguments qui nous semblent assez convaincants ; si elle était définitivement établie, elle représenterait un élément fondamental du mode d'action des matières organiques.

CHAPITRE V

MODIFICATION EXPÉRIMENTALE DE STABILITÉ

Dans cette série d'expériences nous avons cherché à modifier les propriétés de matières organiques d'origines diverses, par des traitements tels que mise en fermentation ou chauffage à différentes températures. On pouvait en effet espérer mettre en évidence par ces procédés des particularités dans le comportement de certaines substances, permettant par la suite soit d'identifier, soit de préciser le mécanisme de leur action.

A. Action du chauffage

D'une façon générale le chauffage à des températures relativement basses des matières organiques produit une transformation qui s'accomplit le plus souvent dans le sens d'une polymérisation. Celle-ci résulte d'une condensation de fonctions constituant les groupes hydrophiles les plus actifs. Le résultat probable de ces traitements devait donc *a priori* se traduire par un accroissement des propriétés hydrophobes du sol.

D'autre part, la combustion des matières organiques dans les champs est à la base de pratiques traditionnelles de l'agriculture telles que l'essartage et l'écobuage. Si la première de ces techniques consiste en une destruction par le feu de la masse végétale recouvrant le sol qui se trouve alors assez peu modifié, l'écobuage, par contre, par lequel on s'efforce de faire brûler la matière organique en mélange intime avec la terre, a une action beaucoup plus marquée. Traditionnellement, on considère que cette technique allège les terres fortes, ce qui implique une certaine dénaturation de l'argile. L'art traditionnel du briquetier et du potier confirme l'existence de telles modifications lorsque le chauffage est intense.

Par ailleurs les résultats récents de LEBORGNE (1960) mettent en évidence une transformation des oxydes de fer se traduisant par l'apparition d'« espèces » à hautes susceptibilités magnétiques bien au-dessous des températures de cuisson technologique. Comme nous le verrons, cet effet est d'ailleurs lui aussi lié à la transformation des matières organiques sous l'influence du chauffage.

Nos expériences ont été poursuivies aussi bien au champ qu'au laboratoire. Nous étudierons donc successivement ces deux aspects de notre travail.

I. — CHAUFFAGE AU LABORATOIRE

a) *Comportement d'un sol pauvre en matières organiques*

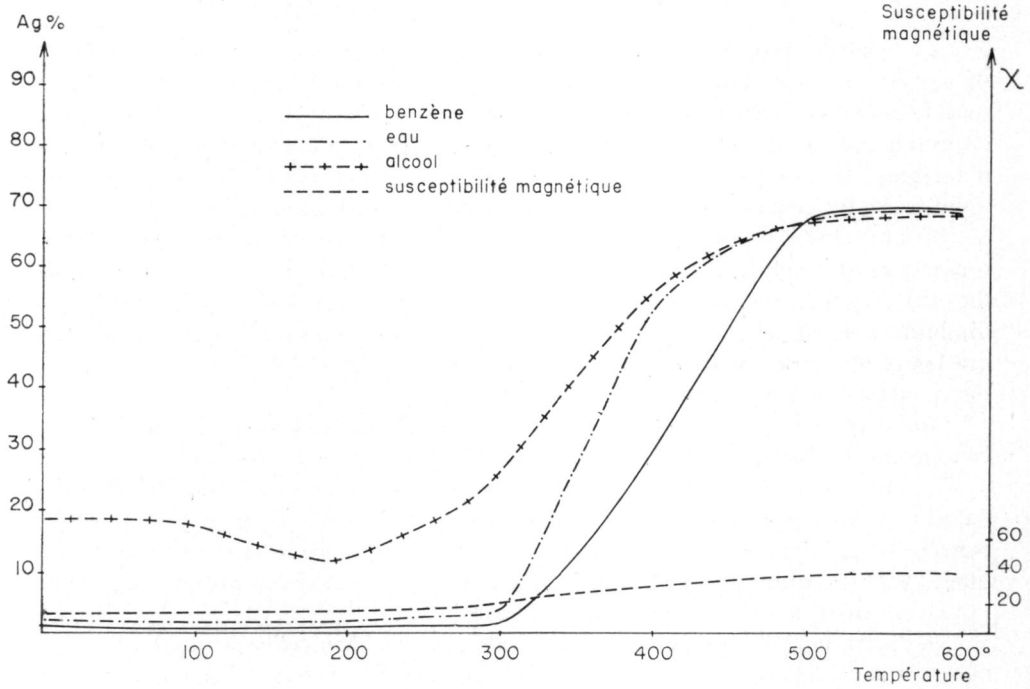
Il était nécessaire tout d'abord d'examiner l'action du chauffage sur un sol dépourvu de matières organiques. Nous avons choisi pour cela des agrégats calibrés (0,2 à 2 mm.) de l'horizon B du sol de limon de Versailles qui ont été portés au four

à moufle pendant 3 ou 4 heures à des tempétatures variables allant de 100 à 600°. Le graphique 17 indique le sens général de variation des différents taux d'agrégats stables.

L'examen comparé des différents tests de stabilité structurale permet de préciser les trois étapes successives de cette variation :

— entre 200 et 300°, seul le traitement « alcool » met en évidence une légère augmentation de la cohésion ;

— entre 300 et 400°, la cohésion devient suffisante pour être décelable par une action non ménagée de l'eau (Ag_e p. 100) et même, dans une moindre mesure, après prétraitement au benzène ;



GRAPHIQUE 17. — *Évolution sous l'influence du chauffage des propriétés d'un sol pauvre en matières organiques*
(Horizon B de Versailles)

— entre 400 et 500°, la cohésion devient très forte puisque à 500° le prétraitement au benzène donne des résultats identiques à ceux des autres prétraitements.

D'une façon générale, nous voyons qu'il s'agit essentiellement ici d'une augmentation de la « cohésion » des agrégats dont, en collaboration avec R. BÉTRÉMIEUX et E. LEBORGNE, (1960), nous avons cherché à analyser le mécanisme. Il ressort de cette étude basée sur la comparaison de l'analyse granulométrique des échantillons chauffés pratiquée avant et après une déferrification ménagée par la méthode de DEB (1950) que les oxydes de fer jouent le rôle de ciments dans cette évolution.

En résumé, il apparaît que dans le cas d'un sol pauvre en matières organiques, les variations de la stabilité structurale provoquées par le chauffage, et qui sont liées

à un accroissement de la cohésion des agrégats terreux, sont explicables par un effet de frittage. Au-dessous de 500°, le frittage se fait par l'intermédiaire des oxydes de fer et les liaisons ainsi créées ne résistent pas plus à une dispersion chimique énergique qu'à l'action brutale du prétraitement benzène ; au-dessus de 500°, le traitement DEB ne libère plus qu'une fraction de particules initiales bien que les minéraux argileux de l'horizon B ne soient pas encore détruits : il est alors possible que des alumino-silicates participent également au frittage et les liaisons qui en résultent sont suffisamment solides pour que le taux d'agrégats stables après un traitement au benzène soit aussi élevé que dans les autres traitements de l'analyse d'agrégats.

b) *Comportement d'un sol enrichi en acides humiques*

Ce résultat étant acquis, nous avons imprégné les mêmes agrégats d'horizon B de 1 p. 100 d'acides humiques extraits de purin ; et ces échantillons ont été portés dans les mêmes conditions aux mêmes températures que dans l'expérience précédente. Le graphique 18 rassemble les résultats obtenus pour les différents tests de l'analyse d'agrégats. La comparaison avec le graphique 17 met en évidence un certain nombre de différences dans le comportement des échantillons chauffés.

Tout d'abord, un premier phénomène qui n'existait pas en l'absence de matières organiques se produit aux environs de 200°. Il s'agit d'une augmentation sensible du taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène accompagnée de la légère diminuti n de Ag_a et Ag_e déjà notée en l'absence de matières organiques. Rappelons que les résultats de l'analyse granulométrique nous avaient alors fait conclure à une dispersabilité plus élevée de l'échantillon chauffé.

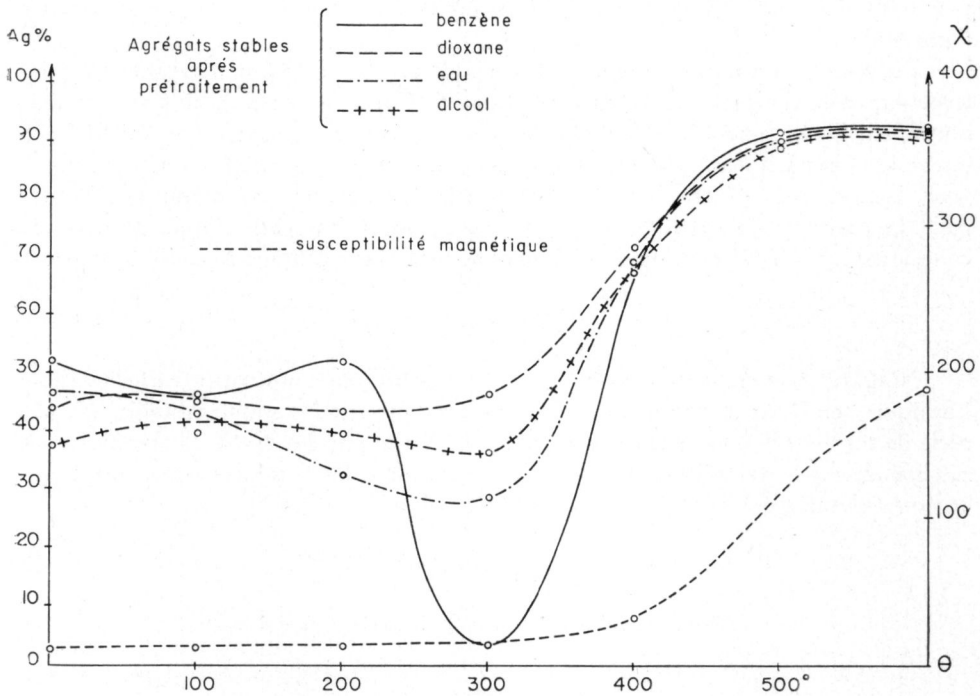
On peut donc interpréter raisonnablement cet accroissement de Ag_b p. 100 comme une diminution de mouillabilité due à une transformation des acides humiques.

A 300°, on assiste, sans modification importante des taux d'agrégats stables à l'alcool et sans prétraitement, à un effondrement du taux d'agrégats stables au benzène dont la valeur rejoint celle de l'échantillon homologue sans matières humiques. Cette évolution peut être rapprochée de celle des teneurs en carbone organique qui baisse entre 200 et 300° de 8,2 à 3 p. 1 000.

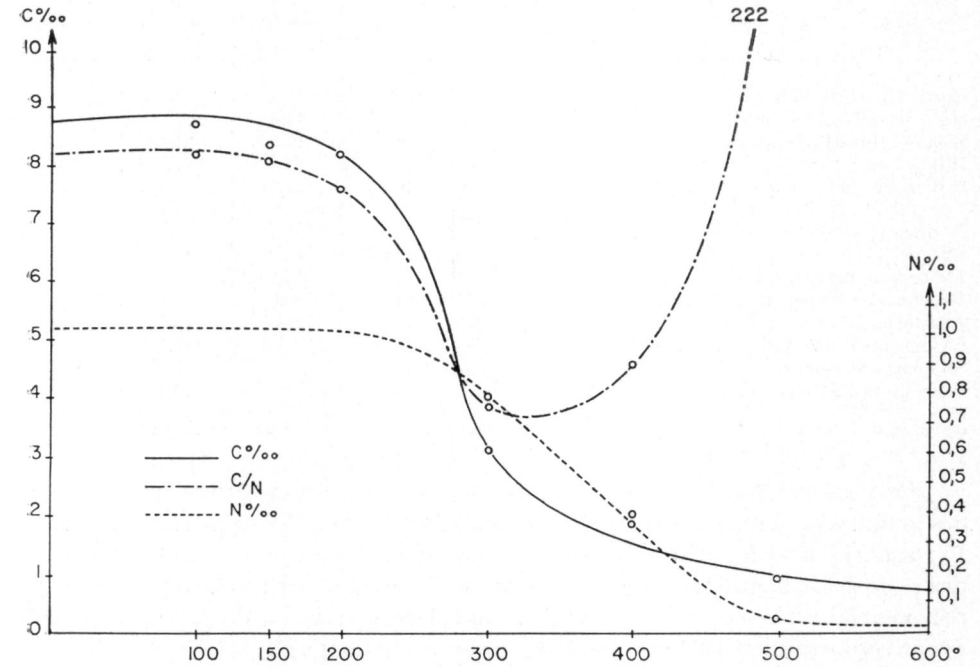
A partir de 300°, l'évolution devient très comparable à celle que nous avions pu observer en l'absence de matières humiques. Le taux de carbone baisse régulièrement pour atteindre vers 600° des valeurs inférieures à 1 p. 1 000 avec toutefois cette particularité qu'au-dessus de 300°, contrairement à ce qui s'était passé auparavant, l'azote organique disparaît plus vite que le carbone puisqu'à 500° les produits résiduels ont un rapport C/N supérieur à 200.

Par ailleurs, il apparaît que l'accroissement de cohésion est plus rapide qu'en l'absence de matières humiques : à 400°, tous les taux d'agrégats, quel que soit le prétraitement, atteignent 70 p. 100 alors que dans l'expérience précédente, cette valeur n'était atteinte qu'à 500° par tous les prétraitements tandis qu'à 400°, Ag_b p. 100 était encore moitié moindre que les taux des agrégats provenant des deux autres prétraitements.

Enfin, le plafond de stabilité atteinte est supérieur dans cette deuxième expérience. Tout se passe comme si les matières organiques résiduelles avaient favorisé les phénomènes de frittage ou comme si les traces organiques à rapport C/N très élevé encore présentes au-dessus de 500° avaient une activité sur la stabilité suffisante



GRAPHIQUE 18. — *Évolution sous l'influence du chauffage des propriétés d'un sol enrichi en substances organiques*



GRAPHIQUE 18 *bis* — *Évolution des substances humiques d'un sol au cours du chauffage*

pour expliquer les 15 à 20 p. 100 d'agrégats supplémentaires dont le graphique montre l'existence.

En résumé, les matières organiques semblent intervenir à deux stades : à relativement basse température, (vers 200°), les acides humiques ou ce qu'ils sont devenus, diminuent sensiblement la mouillabilité du sol mais cette propriété ne résiste pas à une augmentation supplémentaire de température et disparaît complètement à 300°, température de traitement pour laquelle la stabilité est minimum. D'autre part, la présence de matières organiques accélère et intensifie l'apparition de la cohésion que nous avions notée en l'absence de matières humiques à partir de 4 à 500°.

c) *Chauffage de divers échantillons*

Nous avons cherché à chauffer à 200°, c'est-à-dire à la température où les matières humiques semblent jouer un rôle qui leur est propre sur la mouillabilité du sol, une série de terres enrichies artificiellement ou au champ par des matières organiques de natures diverses. Le tableau 10 ci-dessous rassemble les résultats comparés avant et après chauffage à 200° sur ces divers échantillons.

TABLEAU 10

Modification de stabilité structurale par chauffage à 200°

Échantillons	Variation Ag_a %		Variation Ag_b %	
	Avant chauffage	Après chauffage	Avant chauffage	Après chauffage
Horizon B (H.B.) Témoin	17,4	16,4	1,6	1,8
H.B. + carboxyméthylcellulose	77,0	11,8	17	4,8
H.B. + polyacrylate (krilium)	69,0	18	12,2	6,2
H.B. + cire d'abeille	4	77,0	13,0	91,0
H.B. + acides humiques	22,8	24,0	5,4	16,6
Horizon B fermenté en présence de :				
Glucose	27,0	12,0	18,4	9,8
Farine Luzerne	23,0	16,4	13,8	8,4
Racines Ray-Grass	22,4	10,0	3,8	5,0
Racines de Dactyle	25,4	15,8	5,2	5,0
Limon enrichi par fumier			15,7	51,8
Sol sous jeune prairie			25,2	37,6
Terre de marais récemment défriché			46,1	75,4

On constate que les échantillons qui contiennent soit des corps microbiens, soit des produits pré-humiques voient leur stabilité baisser dans des proportions variables. Par contre, l'action anti-mouillante de la cire d'abeille est encore accrue de même que celle des échantillons riches en acides humiques, soit artificiellement, soit naturellement (c'est le cas du sol de prairie, du sol de marais, ou du sol d'une parcelle ayant reçu depuis trente ans des doses massives de fumier).

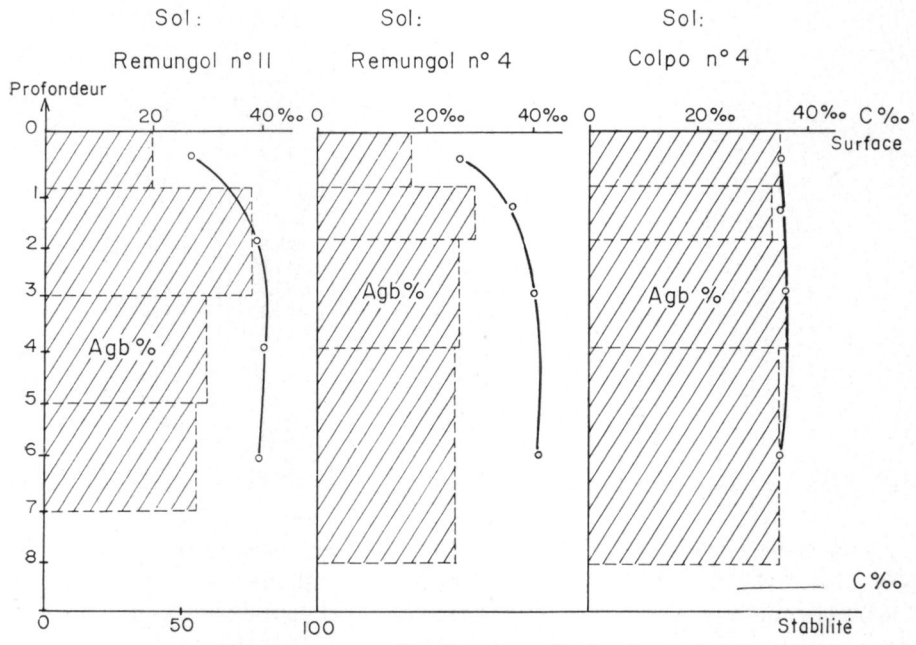
Il ressort de cet ensemble de résultats que s'il n'est pas possible d'établir de

règle générale la nature des matières organiques intervient considérablement pour déterminer la présence et l'intensité de l'accroissement de stabilité mise en évidence.

Il est possible qu'une étude plus fine permette de préciser le résultat qui se dessine : les cires et les substances réellement humiques manifestent après chauffage des propriétés hydrophobes accrues ; au contraire les substances agissant comme ciment et les matières organiques peu évoluées voient leur activité sur la stabilité pratiquement annihilée.

II. — Action des feux en plein champ sur la stabilité des sols

Nous avons en premier lieu étudié le comportement de différents sols sous des feux de paille et de fagots. Les profils de stabilité que l'on trouve ci-contre mettent en évidence la relation qui existe entre la distance des échantillons à la surface, donc entre la température à laquelle ils ont été portés d'une part, la teneur en carbone et la stabilité au benzène d'autre part (graph. 19). On constate que chaque fois



Graphique 19. — *Chauffage de profils de sols en place*

que la couche superficielle (en l'occurence le premier cm) a perdu une quantité importante de matières organiques, le taux d'agrégats Ag_b p. 100 a été fortement diminué. La couche sous-jacente, de 1 à 3 cm de profondeur dont la teneur en carbone organique n'a été que peu diminuée par le feu, voit sa stabilité au benzène sensiblement améliorée. Au-dessous de 3 ou 4 cm, dans le cas de feux d'intensité moyenne, ni la teneur en carbone, ni la stabilité structurale n'ont subi de variations. On peut admettre pour interpréter cette répartition de l'influence du feu suivant la

profondeur que dans la couche la plus superficielle la température devait être de l'ordre de 300 à 400° ce qui correspond à un abaissement très général de la stabilité du sol. Par contre, il est probable que la couche immédiatement sous-jacente a été portée à cette température particulière de 200° qui diminue toujours la mouillabilité d'une partie au moins des matières organiques du sol : celles qui se rattachent au groupe des acides humiques.

Pour préciser ces observations, nous avons comparé sur le sol de limon de la ferme expérimentale de l'I. N. R. A., à la Minière près de Versailles, l'action de deux feux d'intensité différente. Le premier était alimenté par de la paille et du foin mélangé alors que le deuxième était alimenté avec des fagots de bois. Le tableau II permet de comparer la stabilité de 4 couches d'un témoin et de la terre chauffée aux deux intensités différentes.

TABLEAU II

Chauffage de sol — La Minière
(Taux d'agrégats stables après chauffage.)

Profondeur (cm)	Ag_a %	Ag_e %	Ag_b %
1° Témoin			
0-1	10,4	2,8	5,0
1-4	14,8	3,7	3,5
4-8	17,2	3,6	3,7
8-15	14,2	3,5	3,6
2° Feu de paille et foin			
0-1	28,3	25,4	38,0
1-4	14,8	8,8	30,8
4-8	17,4	4,4	4,7
8-15	12,1	4,5	4,9
3° Feu de bois			
0-1	50,9	46,4	52,0
1-4	20,2	12,2	25,9
4-8	14,3	5,4	11,6
8-15	11,5	4,5	4,2

Il ressort de ces chiffres que sous le feu « paille et foin » on note une augmentation considérable de la stabilité au benzène jusqu'à une profondeur de 4 cm alors que seul le premier cm voit sa stabilité alcool augmenter. On peut déduire que l'intensité du feu n'a permis d'atteindre une température permettant un accroissement de cohésion que dans le cm superficiel, la couche de 1 à 4 cm ayant été portée à une température vraisemblablement voisine de 200° ne permettant qu'une diminution de la mouillabilité du sol donc un accroissement de Ag_b p. 100. Par contre, sous le feu de bois, la cohésion est accrue jusqu'à 4 cm et la mouillabilité diminuée jusqu'à 8 cm en raison de l'intensité supérieure du chauffage. Il reste que dans le cas des feux couramment utilisés en agriculture lors du brûlage des pailles de céréales par exemple, seule la stabilité des mottes situées au-dessus de la surface du sol et qui pour cette raison ont pu être portées à une température suffisante voient leur stabilité

quelque peu affectée. En revanche, il apparaît que les feux utilisés lors du défrichement de forêts ou de landes peuvent avoir des conséquences extrêmement sensibles sur les 8 premiers cm du sol, c'est-à-dire sur une partie importante de la future couche arable.

Si nous voulons résumer les enseignements tirés de l'étude des échantillons de sol chauffés, nous pouvons dire que l'intervention des matières organiques dans leur comportement est spécifique des températures inférieures à 400°. Dans la plupart des cas, pour les échantillons naturels, c'est-à-dire pour les échantillons contenant un grand nombre de substances organiques diverses, il se produit aux environs de 200° une diminution de mouillabilité pour au moins quelques unes de ces substances ce qui entraîne un accroissement toujours sensible et parfois extrêmement important de stabilité structurale. D'autre part, il se produit généralement aux environs de 300° une perte en carbone brutale, qui peut aboutir à l'apparition d'un minimum de stabilité.

Pour les températures supérieures à 500°, la stabilisation importante observée semble essentiellement due à des phénomènes de frittage auxquels participent les oxydes de fer et peut-être les alumino-silicates, l'influence des matières organiques n'ayant pour effet que de hâter, c'est-à-dire de faire apparaître à des températures inférieures, cette cohésion et peut-être dans une certaine mesure d'augmenter la cohésion maxima atteinte.

Les résultats obtenus par chauffage expérimental de matières organiques diverses ont montré que c'était essentiellement le groupe des acides humiques, à l'exclusion des produits transitoires de fermentation ou des substances organiques à longue molécule, qui provoquait les diminutions de mouillabilité observées à 200°. Si l'on note que le chauffage d'un échantillon contenant seulement 3 p. 1 000 d'acides humiques permet de faire passer sa stabilité au benzène de 15 à 50 p. 100, on comprendra que les échantillons de sol naturels qui contiennent toujours une certaine quantité de ces substances humiques, réagissent toujours à un chauffage à 200°.

Ainsi on retrouve bien dans le milieu naturel les faits typiques observés au laboratoire à partir des acides humiques. Notre conclusion précédente sans être encore définitive se trouve néanmoins nettement renforcée par cette convergence.

B. Modification expérimentale de la stabilité par fermentation

Les résultats que nous avons obtenus à la suite des expériences d'enrichissement d'échantillons de sol par des produits de fermentation ont mis en évidence, rappelons-le, le rôle très important des corps microbiens et des produits transitoires de l'humification sur la stabilité structurale. Ces conclusions nous ont fait penser qu'il pouvait être intéressant de tester la permanence des effets obtenus. En effet, on pouvait admettre qu'une stabilisation réalisée à partir de substances organiques biologiquement stables avait plus de chance d'être durable que si elle était due à des produits qui ne sont qu'un stade dans le processus général d'humification. Nous verrons d'ailleurs qu'il s'agit là d'un problème qui se pose d'une façon très concrète dans le milieu naturel où l'on doit envisager simultanément l'intensité d'une stabilisation par une technique culturale donnée et la durée de l'effet obtenu.

Nous avons donc examiné quel était le comportement de sols après fermentation d'un mois en présence et en l'absence d'azote minéral. Une technique basée sur ce

principe a été proposée par HÉNIN et ses collaborateurs (1956) pour tester la permanence des conditionneurs dans le sol. Nous avons toutefois préféré le nitrate de calcium à l'urée comme source d'azote : on évite ainsi en effet les perturbations dues aux propriétés dispersantes de l'ammoniaque qui se forme à partir de l'urée. Les échantillons constitués par des agrégats calibrés ont été amenés à une humidité voisine de leur capacité au champ par une pulvérisation fine et placés à l'étuve à 30°, une série comportant l'addition d'azote minéral sous forme de nitrate de calcium ; la quantité de N apportée représente 10 p. 100 de la quantité de carbone présente dans le milieu. Le tableau 12 ci-après rassemble les taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène après un mois de fermentation.

TABLEAU 12

Évolution de la stabilité structurale (Ag_b %) à la suite de fermentation

Échantillons	Sans azote	Avec azote
Sol sous jeune prairie	51	49
Sol sous vieux pâturage	92	94
Sol enrichi par fumier	83	76
Pédologie expérimentale		
H.B. + luzerne fermenté 2 mois	45	35
(Horizon B + glucose) fermenté 45 jours	38	22
Terre de marais très humifère	98	95
Horizon B + polyacrylate	96	91
Horizon B + carboxy méthyl cellulose	55	38
Sol enrichi par du fumier et chauffé à 200°	103	105

Il s'agit de valeurs indexées ; la base 100 représente, pour chaque échantillon, le taux Ag_b % avant fermentation.

On constate que l'évolution de la stabilité est très variable suivant les échantillons Pour certain nombre d'entre eux, il n'y a pas de baisse de stabilité sensible ; c'est le cas de certains sols présentant des teneurs élevées en carbone organique, de l'échantillon enrichi en krilium et d'un échantillon organique chauffé au préalable à 180° mais que nous avions eu la précaution de réensemencer avec une certaine quantité de poudre de l'échantillon non chauffé de façon à ce que les germes détruits par le chauffage soient de nouveau présents dans le milieu. Par contre, d'autres échantillons tels qu'une terre de jeune prairie, un échantillon d'horizon B imprégné de produits pré-humiques issus de la fermentation de luzerne en milieu anaérobie et l'échantillon enrichi en carboxyméthylcellulose et surtout l'horizon B fermenté en présence de glucose voient leur stabilité descendre jusqu'à 20 à 40 p. 100 de sa valeur initiale. En fait, il semble, en ce qui concerne les échantillons naturels, que chaque fois qu'il existait un stock important de matière organique dans le milieu et que les produits « jeunes » ne représentaient qu'une part relativement faible de l'ensemble, la fermentation n'a pas modifié le comportement du sol. La comparaison d'une vieille prairie

et d'une prairie temporaire de trois ans est à cet égard particulièrement significative et nous verrons que cette observation obtenue en un mois au laboratoire confirme l'évolution au champ de la stabilité structurale du sol de ces différentes prairies après leur retournement.

Le comportement comparé de l'échantillon enrichi en krilium et de celui qui avait reçu de la carboxyméthylcellulose est également instructif et confirme les observations de HÉNIN et *al.* Ces auteurs avaient en effet montré que l'un des tests essentiels pour l'appréciation de la valeur d'une substance comme conditionneur de sol devait être un test de fermentescibilité et ils avaient montré que le krilium résistait aux micro-organismes alors que la carboxyméthylcellulose était assez rapidement détruite.

En conclusion, il semble que de tels tests de fermentescibilité présentent un certain intérêt puisqu'ils permettent de se faire une idée de la perennité d'une amélioration donnée, et peut-être dans certains cas d'apprécier la contribution de produits « jeunes » biologiquement instables, à cette amélioration.

CHAPITRE VI

INFLUENCE DE DIFFÉRENTS CATIONS ASSOCIÉS A LA MATIÈRE ORGANIQUE SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE

On considère généralement que la nature des cations qui sont associés à la fraction humique des matières organiques a une influence importante sur les propriétés de cette fraction vis-à-vis de la structure du sol. C'est ainsi que la stabilité structurale des rendzines et sols bruns calcaires par exemple est reliée à la présence d'humates calciques et que les humates alcalins, aisément dispersés des sols salés n'atténuent pas le mauvais comportement de ces sols.

Par ailleurs, nous avons noté (voir p. 378) que le fer semblait jouer un rôle déterminant dans la stabilisation par des substances issues de fermentations.

Nous avons cherché à préciser ces actions sur un type de matière organique déterminé : celui des acides humiques. Nous avons opéré sur une suspension d'horizon B désaturé (horizon B H^+) et d'acides humiques, dispersée en milieu légèrement ammoniacal. La dose d'acides humiques correspondait à 0,5 p. 100 du poids de terre sèche.

La cofloculation de l'horizon B H^+ et de l'humus à été effectuée à l'aide de solutions de différents chlorures et d'acide chlorhydrique.

Après lavage à l'eau distillée par centrifugation pour éliminer l'excès de sel les différents floculats ont été essorés sur Buchner et séchés à la température du laboratoire. Les galettes de terre ainsi obtenues ont été forcées à la main au travers d'un tamis à mailles carrées de 2 mm. d'ouverture et soumises à des tamisages sous l'eau après différents prétraitements, dans les conditions standard de l'« analyse d'agrégats ».

Le tableau 13 présente les résultats obtenus, exprimés en taux d'agrégats stables $> 200\ \mu$.

TABLEAU 13

Influence du cation sur l'activité stabilisatrice de divers humates

Prétraitement	Agent floculant				
	ClH	Cl_2Mg	Cl_2Ca	Cl_3Al	Cl_3Fe
Dioxane	10,8		12,0	8,4	13,2
Alcool éthylique	5,8	5,3	4,8	7,0	5,6
Air		1,2	2,8	2,0	1,3
Benzène	6,0	1,0	1,6	22,8	27,6
Nitrobenzène	38,7	17,0	22,0	46,0	53,0

Il ressort de ces chiffres deux informations principales :

— Tout d'abord nous trouvons ici une confirmation du fait que la fixation au sol d'acides humiques ou de leurs sels de métaux di- et trivalents ne provoque pas de modification sensible de la cohésion du sol telle qu'elle apparaît au travers des tests comportant prétraitement à l'alcool ou au dioxane. Cette conclusion apparaît de plus *indépendante du mode opératoire,* fort différent ici de celui utilisé pour la fabrication des « échantillons-modèles ».

— La deuxième information concerne l'action des humates di- et trivalents et celle des acides humiques sur la mouillabilité du sol (prétraitements au benzène et au nitrobenzène). On constate qu'une diminution de mouillabilité sensible n'est observée que pour les terres floculées par l'acide chlorhydrique et les chlorures de fer et d'aluminium. Les humates alcalinoterreux et singulièrement les humates de calcium ne semblent pas montrer, à ces concentrations du moins, les propriétés stabilisantes particulières qu'on leur attribue couramment.

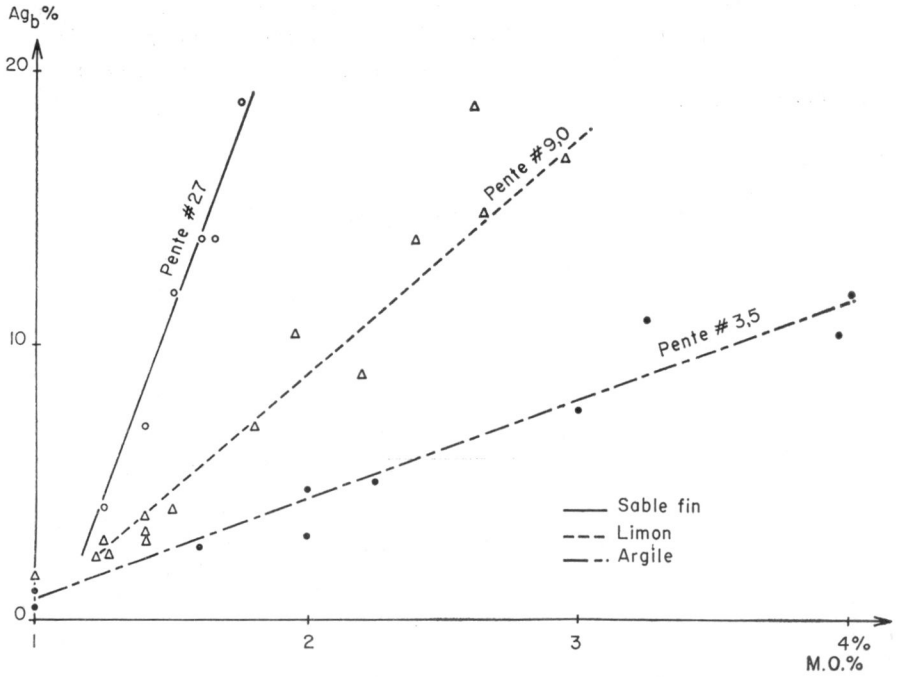
Par contre les humates d'aluminium et surtout de fer ainsi qu'à un degré moindre les acides humiques séchés se montrent beaucoup plus fortement hydrophobes.

Nous retrouvons donc ici un élément supplémentaire en faveur du rôle important joué par le fer associé à des matières organiques dans les phénomènes de stabilisation de la structure.

CHAPITRE VII

RELATIONS ENTRE LA NATURE DU SUPPORT MINÉRAL ET L'EFFICACITÉ DES MATIÈRES ORGANIQUES

Nous avons étudié jusqu'ici l'action de substances diverses mais qui étaient toutes fixées sur un même support minéral. Ce parti pris avait été adopté, rappelons-le pour faciliter la comparaison des résultats.



GRAPHIQUE 20. — *Allure de la stabilisation par la matière organique de 3 sols de textures différentes*

Il est toutefois apparu au cours de ces recherches qu'il pouvait exister une certaine interaction entre l'efficacité des matières organiques et la nature du support minéral et plus particulièrement sa texture.

Pour préparer la transposition au milieu naturel des conclusions dégagées nous avons cherché à préciser l'importance de cette interaction.

Il s'agit là d'un problème particulièrement difficile : on ne peut en effet admettre *a priori* qu'une telle interaction sera indépendante du type de matière organique et de son mode d'action principal sur la stabilité structurale.

Nous nous sommes bornés à l'étude du cas moyen présenté par la matière organique de sols sous prairie. Trois séries d'échantillons représentant chacune un type de texture ont été soumises au laboratoire aux tests de stabilité structurale et on a dosé la matière organique liée qu'ils contenaient.

Pour chaque série nous avons établi graphiquement la relation existant entre le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène Ag_b p. 100 et le taux de matières organiques liées. Le graphique 20 permet de constater que la pente des droites représentatives de ces relations sont extrêmement différentes suivant la texture de la série correspondante. C'est ainsi qu'une augmentation de 1 p. 100 du taux de matière organique liée provoque pour un sable fin, pauvre en argile et en limon, un accroissement de 27 p. 100 d'agrégats stables après prétraitement benzène tandis que cet accroissement n'est que de 9 p. 100 pour un sol de limon et de 3,5 p. 100 pour une terre très argileuse. Cette constatation est en accord avec nos conclusions concernant le mécanisme d'action des matières organiques. En effet, si ce dernier consiste bien pour l'essentiel en une diminution de la mouillabilité du sol l'action des matières organiques doit être liée à un phénomène d'enrobage et leur efficacité, à une dose déterminée, doit être d'autant plus faible que la surface à protéger est plus portante. Notons que cette surface est principalement sous la dépendance de la teneur du sol en éléments inférieurs à 2 μ (argile granulométrique).

Une confirmation de cette hypothèse nous est fournie par la comparaison des deux graphiques 21 et 22 établis pour une série d'échantillons de textures très différentes renfermant des quantités variables de matières organiques d'origines diverses.

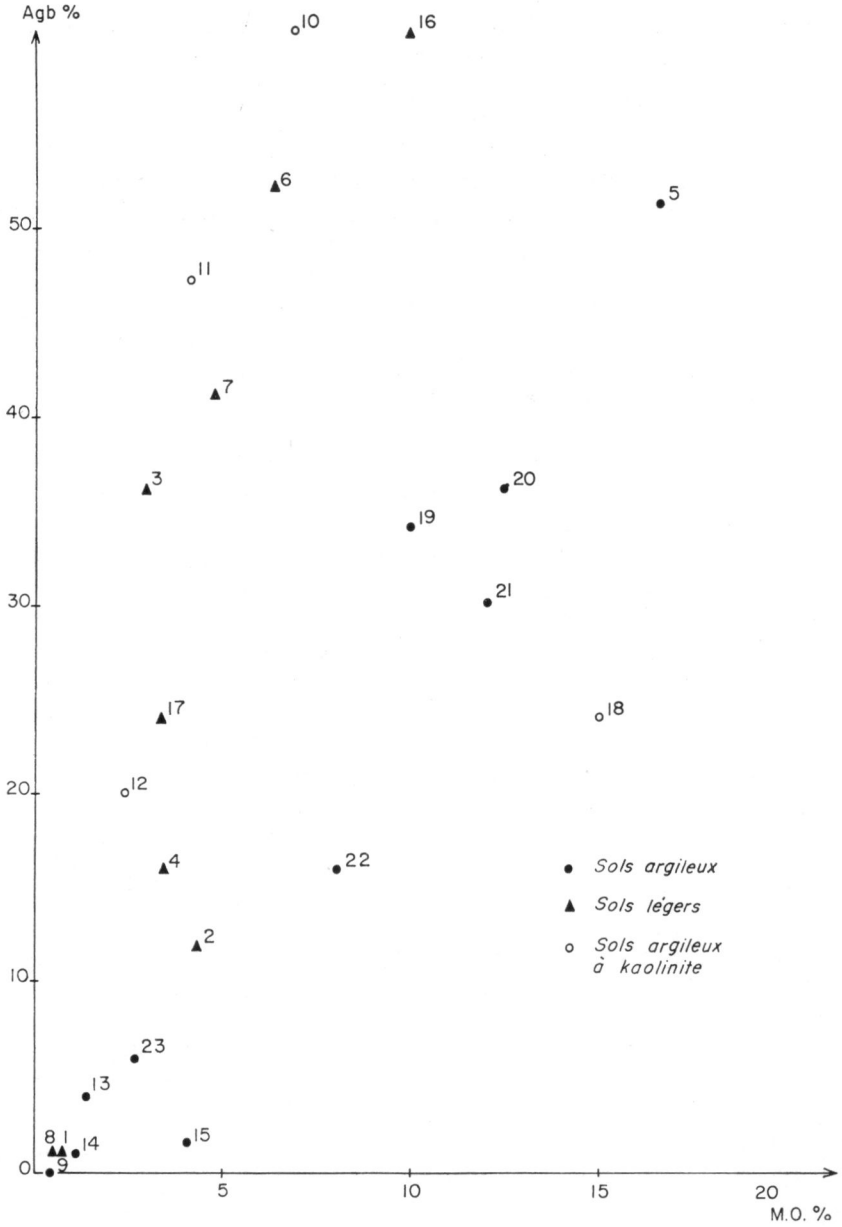
Sur le premier graphique nous avons porté en abscisse la teneur en matières organiques liées et en ordonnée le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène. On constate que les points représentatifs des différents échantillons sont très dispersés. De plus et à 3 exceptions près (points 10, 11 et 12) pour une teneur en matière organique donnée les terres argileuses présentent des taux d'agrégats stables Ag_b p. 100 plus faible que les sols plus légers.

Mais si, comme nous l'avons fait sur le deuxième graphique nous remplaçons en abscisse le taux de matières organiques liées par le rapport $\frac{\text{matière organique liée p. 100}}{\text{argile p. 100}}$ de façon à tenir compte de l'importance de la surface à protéger, nous voyons que l'ensemble des points (à l'exception encore des 10, 11 et 12) se regroupent le long d'une courbe et cela d'une façon apparemment indépendante de la texture des sols qu'ils représentent.

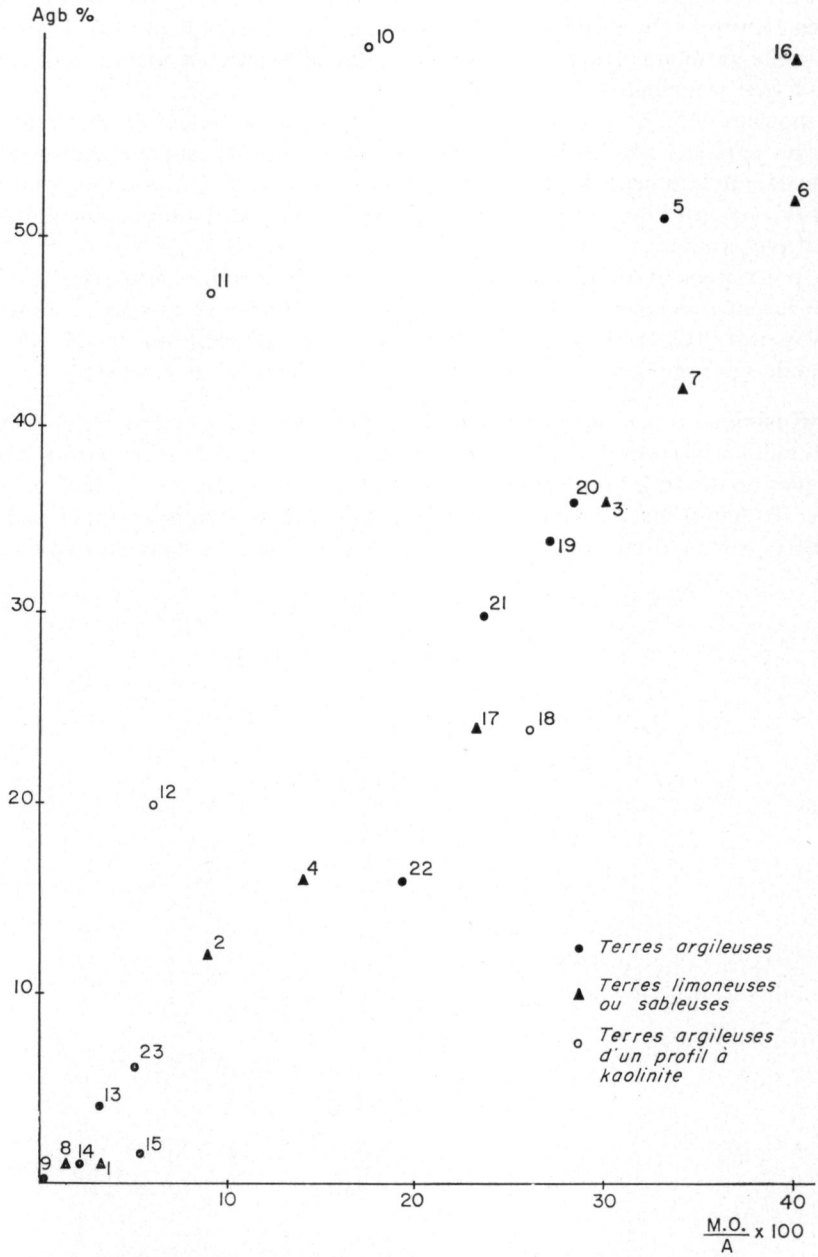
Il semble donc qu'on puisse considérer comme acquise l'importance de l'interaction entre les teneurs en matières organiques et en argile, vis-à-vis de la mouillabilité du sol.

L'exception à cette règle des points 10, 11 et 12 qui représentent 3 échantillons à 45 p. 100 d'argile issus d'un même profil de sol souligne toutefois l'insuffisance de la seule teneur en argile à définir la surface interne du sol. Le fait que ces trois points représentent des échantillons riches en kaolinite alors que les autres sols contiennent essentiellement d'autres types de minéraux argileux, conduit à penser qu'une étude plus approfondie à ce sujet devrait tenir compte de la nature des minéraux des argiles au même titre que de la teneur en éléments de diamètre moyen inférieur à 2 μ.

Par ailleurs, un certain nombre d'auteurs tels que S. MÉRIAUX (1958), MOREL et MASSON (1958), G. MARTIN (1963), A. COMBEAU (1960) ont présenté des relations



GRAPHIQUE 21. — *Relation existant pour des sols de textures très variées entre la teneur en matières organiques et la stabilité* (Ag_b %)



GRAPHIQUE 22. — *Relation existant pour des sols de textures très variées entre le rapport Matière organique/Argile et la stabilité*

établies indépendamment de la texture entre la teneur en matière organique et l'aspect de la stabilité structurale qui se traduit par le taux Ag_b p. 100. Le fait que ces relations aient pu être établies montre seulement que les sols étudiés avaient une homogénéité granulométrique suffisante pour que la teneur en matières organiques soit le facteur principal.

Rappelons enfin que nous avons noté (p. 343) que la teneur en matières organiques des agrégats stables au benzène, très variable, est généralement beaucoup plus élevée que la teneur des terres totales correspondantes ; un examen plus précis permet de constater que cette teneur en p. 100 de Ag_b est d'autant plus élevée que le sol est plus argileux.

Le prétraitement au benzène aboutit ainsi à trier parmi les agrégats du sol ceux qui présentent une teneur en matière organique supérieure à un seuil. La valeur de ce seuil paraît être en relation avec la surface interne spécifique du sol, elle-même fonction de sa granulométrie et de la nature minéralogique des fractions.

En conclusion nous pensons avoir montré par plusieurs voies différentes qu'il existait une interaction importante entre la texture du sol et sa stabilisation par les matières organiques en général. Ce phénomène apparaît d'ailleurs clairement dans ses conséquences au champ sur le comportement de différents sols soumis à un même système de culture. Nous aurons donc à revenir sur ce point dans la deuxième partie de ce travail.

Conclusions de la première partie

Les conclusions des études relatées dans la première partie de ce mémoire concernent tout d'abord les mécanismes du ralentissement de la dégradation structurale du sol.

Parmi les facteurs susceptibles d'intervenir dans les processus de destruction des agrégats terreux, il est apparu que les principaux étaient la mouillabilité du sol, facteur actif, et la cohésion de la terre humide, facteur de résistance. Il s'agit donc là d'une confirmation de la théorie de HÉNIN pour lequel, rappelons-le, la stabilité peut être évaluée comme la différence entre la cohésion de la terre humide et la pression capillaire dans les pores du sol, elle-même proportionnelle à la mouillabilité des parois pour chaque classe de taille des pores du sol.

Compte tenu des difficultés que l'on rencontre lorsqu'il s'agit d'apprécier directement, même si c'est d'une manière relative, ces deux facteurs, il est apparu qu'il était d'un grand intérêt de disposer d'une méthode permettant d'apprécier les conséquences de la variation de ces facteurs sur la stabilité structurale. L'ensemble des tests que nous avons utilisés répond à cette exigence. Tout en permettant d'obtenir un indice reflétant globalement la stabilité du sol, certains tests fournissent des résultats en bonne corrélation avec une estimation directe soit de la mouillabilité soit de la cohésion du sol à l'état humide. Nous avons donc eu ainsi la possibilité d'interpréter les modifications de comportement que nous avions provoquées sans avoir recours à des appréciations directes qui ne restent valables, nous l'avons vu, que comparativement lorsque les autres caractéristiques du sol restent inchangées.

En ce qui concerne le mécanisme propre de l'action des matières organiques, nous avons dans un premier temps étudié les aspects liés à la nature et aux propriétés physico-chimiques de substances définies. Ce travail, effectué à partir d'échantillons-modèles a mis en évidence l'importance des modifications de mouillabilité par rapport aux modifications de cohésion. En effet, la grande majorité des substances testées ont eu une action du premier type. De plus, une modification de mouillabilité suffisante pour entraîner une variation sensible de stabilité peut être obtenue à partir de très petites quantités de substances actives.

Dans un deuxième stade, nous avons fait intervenir des phénomènes plus complexes permettant de se rapprocher des processus intervenant dans le milieu naturel et liés essentiellement à l'évolution des matières organiques. Leur analyse, possible dans les conditions du laboratoire a permis de dégager un certain nombre de conclusions :

Les fermentations jouent un rôle prépondérant dans l'accroissement de stabilité qui suit la mise au contact d'agglomérats terreux et de débris organiques. Les agents de la fermentation eux-mêmes (champignons, bactéries...) sont chronologiquement les premiers à modifier le comportement du sol. Leur action présente souvent un caractère explosif : elle est très importante mais de courte durée et cela d'autant plus que le métabolite de départ est plus fermentescible.

Ensuite, les produits transitoires de la fermentation interviennent. Leur efficacité spécifique reste très élevée et liée aux conditions de la fermentation et en particulier à la répartition des débris organiques qui leur ont donné naissance, (c'est la règle du mélange) à l'aération du milieu et à sa richesse minérale. Il ne semble pas que la qualité de ces derniers, leur origine végétale en particulier, intervienne autrement qu'en accélérant les processus de formation.

Quant aux produits terminaux de l'évolution, ceux que l'on peut regrouper sous la dénomination d'humus, leur activité est sensiblement plus faible mais de plus longue durée ; il semble alors que les conditions dans lesquelles s'effectue leur liaison à la partie minérale du sol, les interactions entre la quantité qu'ils représentent et la texture des matériaux stabilisés jouent un rôle tout à fait capital.

En résumé l'incorporation au sol d'une matière organique peut avoir des effets très différents non seulement par l'intensité de l'augmentation de stabilité qui en résulte mais aussi par la durée de cette action. Cet aspect dynamique est important à considérer car les stabilisations de courtes durées paraissent jouer un rôle de premier plan.

La bibliographie paraîtra en fin de 2e partie.

SUMMARY

ACTION OF THE ORGANIC MATTER ON THE STABILITY OF THE SOIL STRUCTURE. FIRST PART

Only an analysis of the numerous modifications of the soil properties, after the incorporation of organic matter, can allow a precise evaluation of their role and the interpretation of culture trials which are sometimes contradictory. The study of the action of the organic matter on the structure stability, which is the aim of this paper, may be considered as a contribution to this analysis.

The complexity of the phenomena *in situ* also rendered necessary the division of this study into two parts :

— *First part* : Study, on laboratory models, of the mechanisms and modalities of the stabilization by the organic matter.

— *Second part* : Testing of the validity of the rules thus obtained by confronting them with the data obtained under the conditions of a natural medium or of the agricultural praxis.

After having recalled, in its main lines, HÉNIN's theory on the degradation of the soil structure, described the methods of analysis and exposed why they have been chosen, the first part presents the results obtained in laboratory.

— The fixation in the soil of different well known organic compounds puts into evidence the importance of the modifications in the « moistability » in respect of the modifications of cohesion in the stabilization mechanisms.

— If we now consider phenomena which are closer to the processes occuring in a natural medium and which are connected with the evolution of the organic matter in the soil, we discover the preponderant part played by the fermentations which cause the « humification ».

— The very agents of these transformations (fungi, bacteriæ) are the first to increase the structural stability. Their action is very intense, but lasts very little because of the abatement of the fermentability in the course of their evolution.

— The transitory products of the humification then come into action. Their specific effectivity stays very high, it seems to be independant of the vegetal origin of the incorporation but is bound with the fermentation conditions (distribution, aeration, mineral richness of the medium).

— Lastly, at the end of the evolution, the effectivity of the residual humus, weaker but far more lasting, depends on the conditions under which its binding to the soil is carried out and also on the latter's texture.

There appeared thus two main conclusions : an appreciation of the soil stability by organic incorporation should be expected as well from a dynamic point of view (lasting of the effect obtained) as from a static one (intensity of this effect).

— At a given stage, the conditions of formation of the active matter and of their fixation in the soil may be determining.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DER ORGANISCHEN MASSE AUF DIE STÄBILITAT DER BODENSTRUKTUR. ERSTER TEIL

Nur eine Untersuchung der zahlreichen Änderungen der Bodeneigenschaften, als Folge des Einbringens organischer Masse, erlaubt eine genaue Bewertung der Rolle und die Auswertung manchmal widersprechender Kulturversuchen. Das Studium der Wirkung organischer Masse auf die strukturale Stabilität, Gegenstand dieser Arbeit, kann als Beitrag zu dieser Untersuchung angesehen werden.

Es ist auch der komplexe Charakter dieser Erscheinungen *in situ* die die Aufteilung in zwei Arbeitsabschnitte erfordert :

— *Erster Teil* : Studium auf Labormodellen der Mechanismen und Modalitäten der Stabilisation durch die organische Masse.

— *Zweiter Teil* : Prüfung der Gültigkeit der so abgeleiteten Regeln durch Gegenüberstellung mit den erhaltenen Daten in natürlichem Milieu und in der landwirtschaftlichen Praxis. Nachdem wir in den grossen Zügen die Theorie von HÉNIN über die Degradierung der Bodenstruktur in Erinnerung brachten, die Untersuchungsmethoden beschrieben, die Gründe ihrer Wahl darlegten, kommen im ersten Teil die Ergebnisse, die wir im Labor erhielten :

Die Festlegung im Boden verschiedener organischer Verbindungen mit bekannten Eigenschaften zeigt die Wichtigkeit der Änderungen in der Benetzbarkeit in Bezug auf die Kohäsionsänderungen in den Stabilisierungsmechanismen.

Geht man zu Erscheinungen über, die sich mehr denjenigen des natürlichen Milieus nähern und die an die Entwicklung der organischen Masse im Boden gebunden sind, so entdeckt man die führende Rolle der Fermentationen, die die « Humifizierung » bewirken. Die Träger dieser Umwandlungen (Pilze, Bakterien) sind die Ersten, die die Strukturstabilität erhöhen. Ihre Wirkung ist äusserst intensiv, aber von kurzer Dauer, infolge des Erlahmens des Fermentationsvermögens der Produkte im Laufe ihrer Evolution.

Die Ubergangsprodukte der Humifizierung greifen dann ein. Ihre spezifische Wirksamkeit bleibt sehr hoch ; sie scheint unabhängig zu sein vom pflanzlichen Ursprung des Anfalls, bleibt jedoch an die Bedingungen der Fermentation gebunden (Verteilung, Lüftung, mineralischer Reichtum des Milieus).

Endlich, am Ende der Evolution, ist die Wirksamkeit des restlichen Humuses schwächer aber dauerhafter, in Abhängigkeit von den Bedingungen, in denen sich die Bindung mit dem Boden vollzieht, und auch von der Textur desselben.

So erscheinen zwei wichtige Forderungen : eine Bewertung der Bodenstabilität durch organische Masse muss sowohl vom dynamischen Standpunkt (Dauer des erzielten Effekts) als vom statischen aus erfolgen (Intensität dieses Effekts).

In einem gegebenen Stadium können die Bedingungen der Bildung der aktiven Stoffe und ihre Bindung an den Boden entscheidend sein.

Действие органического вещества почв на устойчивость почвенной структуры.

Г. МОННЬЕ (Версаль).

РЕЗЮМЕ

Только анализ многочисленных изменений свойств почвы, произошедших после внесения в нее органических веществ, может позволить беспристрастно оценить роль этих последних и истолковать часто противоречивые результаты опытных культур Являющееся предметом данной работы изучение действия органических веществ на устойчивость почвенной

структуры, может разсматриваться как контрибуция автора к этому вопросу :

Но, сложность изучаемых « in situ » феноменов принудила его разделить эту работу на два этапа :

— *Часть первая :* Изучение механизмов и видов стабилизации вызванной органическими веществами, на моделях реализованных в лаборатории.

— *Часть вторая :* Проверка действительности выведенных заключений при помощи их сопоставления с данными полученными в условиях природной среды и сельскохозяйственной практики.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

После краткого напоминания теории Хенэна о разрушении почвенной структуры, описания методов применявшихся в данной работе и указания причин их выбора, автор приводит, в первой части, результаты лабораторных опытов :

— Закрепление почвой различных органических соединений обладающих известными уже свойствами, выявляет размеры изменения способности к увлажнению по сравнению с изменением спаянности механизмов стабилизации.

— Если — же перейти к явлениям приближающимся к процессам происходящим в природной среде и связанным с эволюцией органического вещества почв, то открывается ведущая роль брожения, являющегося началом « гуммификации ».

— Агенты превращения (грибы, бактерии), сами по себе увеличивают устойчивость структуры. Действие их весьма интенсивно, но длительность его не велика, таккак по мере их эволюции, способность продуктов к брожению, ослабевает.

— Затем начинается работа переходных продуктов гуммификации. Их спецефическая эффективность стоит на довольно высоком уровне; она как-будто не зависит от растительного происхождения внесенных веществ, но связанна с условиями в которых протекает брожение (распределение, аэрация, минеральный состав среды).

— И, наконец, последняя стадия эволюции, — остаточная эффективность самого гуммуса, менее сильная, но и более длительная, зависит от условий в которых происходит связывание его почвой и также от механического состава последней. Напрашиваются поэтому два следующих главных вывода :

— Необходимость предвидеть оценку устойчивости почвы при помощи внесения, органических веществ, как с точки зрения динамической (длительность полученного эффекта), так и статической (интенсивность эффекта).

— В данной стадии, условия образования и закрепления почвой активных веществ, могут быть решающими.

Ann. Agron., 1965, **16** (4), 401-432.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE ÉCOLOGIQUE DU MASSIF DE LA MARGERIDE

Observations sur la pédogenèse et le dynamisme de la végétation sur les granites

G. LONG et Ph. DAGET

Centre d'Études phytosociologiques et écologiques, Montpellier
Centre national de la Recherche scientifique, Paris

SOMMAIRE

Les régions naturelles de la Margeride et du Gévaudan constituent ensemble le Massif de la Margeride. Dans cette région, la dépopulation chronique entraîne l'extension de la forêt sur les terres abandonnées.

A la suite de l'abandon de la culture, et en l'absence d'utilisation pastorale, la friche à *Holcus mollis* se boise spontanément en Pin sylvestre ; dans l'ambiance forestière ainsi créée le Hêtre s'installe et finit par éliminer le Pin.

Le « pseudo-étage » de végétation du Pin sylvestre est donc inclus dans l'étage du Hêtre.

En conséquence, les sols forestiers sont constitués de deux phases : une phase représentée par un sol hérité, de type Brun de culture et une phase correspondant à un sol actuel dont l'état d'évolution est sous la dépendance de l'âge de la forêt, passant ainsi du Ranker à Mor imparfait au Sol Brun acide à Mull acide.

Les notions de « phase » et de « sol hérité » initialement appliquées aux seuls facteurs climatiques sont étendues, par les auteurs, aux facteurs biologiques.

I. — INTRODUCTION

A. *Objet de l'étude*

Depuis 1962, dans le cadre des activités du Centre d'Études phytosociologiques et écologiques du C. N. R. S., des recherches phyto-écologiques ont été entreprises dans le Massif de la Margeride.

Ces recherches ont été conduites sous la forme d'une étude écologique et floristique de nombreuses stations de référence, choisies en fonction des différentes situations topographiques, sur les diverses roches-mères et dans les principales unités de l'occupation des terres (cultures, herbages, landes, forêts).

Ces études stationnelles ont permis de distinguer plusieurs types d'évolution des sols et de la végétation, selon les conditions de milieu et d'utilisation des terres par l'homme ; nous n'examinerons dans ce premier mémoire que la série évolutive qui a pour point de départ la parcelle cultivée, puis abandonnée.

Tous les milieux examinés dans cet article ont été cultivés dans un passé plus ou moins récent. La séquence des sols décrite va ainsi du sol actuellement soumis aux façons culturales, au sol forestier, anciennement cultivé ; étant donné qu'il s'agit d'un sol forestier âgé d'environ un siècle, on peut commencer à parler d'un sol climacique ; cette notion correspond au « plésioclimax » de GAUSSEN. Les profils décrits sont tous développés sur granite porphyroïde.

L'étude de cette séquence pédologique permettra de présenter une interprétation de l'évolution pédogénétique des milieux inventoriés.

Parallèlement, une séquence de types de végétation, appartenant tous à une seule série dynamique, sera décrite. Les stades analysés seront : la jachère (en cours d'enrésinement artificiel), le perchis de Pin sylvestre, la futaie de Pin sylvestre et la forêt de Hêtre.

B. *Généralités*

1. *Situation de la Margeride.*

Le Massif de la Margeride est situé dans le Massif central, entre la vallée de l'Allier, à l'Est, et les Monts du Cantal et de l'Aubrac, à l'Ouest. Il couvre une superficie assez importante : 350 000 ha environ. On peut y distinguer trois sous-régions :

a) A l'Ouest, le *Gévaudan* [1], constitué de larges plateaux mollement ondulés et dont l'altitude moyenne est comprise entre 1 000 et 1 200 m.

b) Au centre, la *Montagne de la Margeride*, caractérisée par une échine arrondie, d'orientation Nord-Sud, avec, çà et là, quelques chicots rocheux, les « Trucs » (Truc de Fortunio, 1 554 m). Son altitude moyenne est comprise entre 1 200 et 1 500 m.

c) A l'Est, le *Plateau oriental de la Margeride* dont les caractéristiques sont voisines de celles du Gévaudan.

Ces deux dernières sous-régions constituent la *Margeride*, terme général qui est souvent étendu, localement, au Gévaudan lui-même.

Trois départements se partagent cette région naturelle : la Lozère, la Haute-Loire et le Cantal.

2. *Conditions écologiques générales.*

a) *Géologie.*

La région étudiée est un batholite de granite porphyroïde, dit « de la Margeride », dans lequel des filons de microgranite ou de quartz, des culots de basalte ne constituent que des variations de détail (LAPADU-HARGUES, 1947).

b) *Bioclimatologie.*

Le climat de cette région est rude ; les hivers y sont longs et froids, les été chauds et orageux. Située dans une zone de transition, la Margeride est caractérisée à la fois

[1] Au sens de l'I. N. S. E. E. ; le Gévaudan historique peut pratiquement être confondu avec l'actuel département de la Lozère.

par des influences climatiques océaniques, continentales et méditerranéennes. Le régime pluviométrique saisonnier y est très variable d'une année à l'autre, et d'une station à l'autre.

TABLEAU I

Données climatologiques de 2 stations caractéristiques de la Margeride.

Stations	Alt.	P	M	$\overline{m}$	m	Q	I
Rieutort	1 140	858	23	7,2	— 6,0	106	49,8
Chateauneuf-de-Randon	1 280	756	20	6,7	— 5,8	105	45,2

Alt = Altitude en m.
P = Précipitations moyennes annuelles en mm.
M = Moyenne des maximums du mois le plus chaud (°C).
$\overline{m}$ = Température moyenne annuelle (°C).
m = Moyenne des minimums du mois le plus froid (°C).
Q = Coefficient pluviothermique d'Emberger.
I = Indice de E. de Martonne.

c) *Utilisation du sol.*

Vieille terre agricole, la Margeride est, dans son ensemble, une région d'émigration. Les terres abandonnées sont fréquentes et, pour la plupart, livrées au pâturage extensif puis, après arrêt du pâturage, à la conquête naturelle du Pin sylvestre. Ces caractéristiques, il faut le souligner, confèrent au paysage rural de cette région une impression, très trompeuse, d'équilibre agro-sylvo-pastoral.

En ce qui concerne plus particulièrement la chaîne de la Margeride, ses caractéristiques démographiques et économiques sont assez différentes. La pression humaine s'y est manifestée plus sous la forme du pasteur que sous celle du cultivateur. La forêt naturelle a dû reculer devant les troupeaux transhumants parcourant la région ; il ne subsiste ainsi que quelques rares massifs de Hêtre alors que le paysage rural est dominé par les landes de Bruyère (*Calluna vulgaris* (L.) HULL) et à Nard (*Nardus stricta* L.) des croupes culminales.

En dehors des rares hêtraies-sapinières (Mont Mouchet) ou des reboisements artificiels de résineux (Pin sylvestre d'Auvergne, Épicéa, Douglas) la forêt est presque partout improductive ou très faiblement productive.

d) *Dynamisme de la végétation.*

Afin de mieux comprendre la séquence des stations étudiées, il convient de présenter brièvement les stades succédant normalement à l'abandon de la culture.

Deux cas sont à envisager selon les modalités de l'influence pastorale.

Dans le premier cas, le stade pastoral post-cultural étant très prolongé, les espèces arbustives de la lande ont la possibilité de s'implanter ; on observe alors la succession classique suivante :

Culture — Pelouse — Lande — Forêt

Dans le second cas, le retrait rapide du bétail et la proximité de Pins sylvestres semenciers permettent l'installation rapide de la forêt ; on observe alors les trois stades suivants :

Culture — Pelouse — Forêt

C'est cette dernière série qui a retenu notre attention dans le présent mémoire.

II. — PRÉSENTATION DES STATIONS ÉTUDIÉES

A.— Station 1 — Jachère travaillée.

La parcelle choisie est située dans le Gévaudan, à mi-chemin entre Javols et Serverette, à une altitude voisine de 1 000 m. Elle est exposée à tous les vents; sa pente est de 4 p. 100 environ. Elle a subi des façons culturales récentes (photo 1).

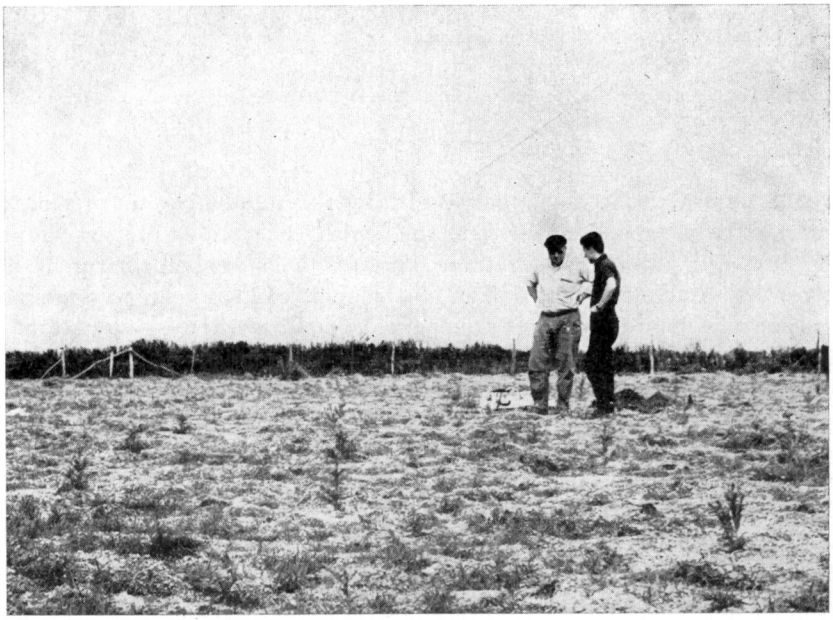


Photo 1. — *Jachère vive de la station 1*

Cette jachère a été récemment plantée en *Epicéa*, on les aperçoit en ligne au centre de la photographie. Le sol apparaît très clair en raison de l'action nettoyante des intempéries (voir photo 2) ; au fond on aperçoit une lande de *Cytisus purgans*.

1. *Le sol*

— La tranchée ouverte permet d'observer nettement deux horizons, le premier de 0 à 17 cm, le second de 17 à 40 cm environ.

— La surface du profil est caractérisée par une couche de gravillons, de graviers et de petits cailloux bien lavés. Ces matériaux ont un aspect plus ou moins poli.

— Le premier horizon a une consistance lâche ; il est possible de le retirer à la pelle ; le second, par contre, est très dur et doit être attaqué à la pioche. Les racines sont localisées dans le premier horizon. La roche-mère est le gore du granite porphyroïde de la Margeride.

— Jusqu'à 17 cm, la terre a une couleur un peu plus sombre qu'en profondeur ; on passe brusquement du brun rougeâtre (5 YR 4/4) au brun jaunâtre (10 YR 5/6) (1).

— La texture est grossière : il n'y a que 55 p. 100 de terre fine dans le premier horizon et seulement 43 p. 100 dans le second ; on note, en outre : 5 à 10 p. 100 de cailloux dans le premier horizon et 30 p. 100 dans le second.

— La structure du premier horizon est faiblement polyédrique subanguleuse et très fragile ; celle du second est faiblement polyédrique anguleuse et fragile.

— C'est un sol sec et bien drainé.

— Les deux horizons ont des taux de matière organique voisins de 3 p. 100 ; le C/N du premier est de 10,3.

— L'acidité du sol est assez marquée, puisque le premier horizon a un pH de 5 et le second de 5,5. La capacité d'échange est de 8,6 méq/100 g dans le premier horizon et de 6,8 méq/100 g dans le second. Les teneurs en cations échangeables, exprimées en milliéquivalents, sont indiquées dans le tableau 2 ci-dessous.

TABLEAU 2

Hor.	T	Na	K	Ca	Mg	S	S/T %
I.....	8,6	0,1	0,4	1,4	0,9	2,8	33
II.....	6,8	0,1	0,2	0,6	0,5	1,4	20

Il convient de signaler que la parcelle a reçu récemment une fertilisation NPK.

2. *Interprétation des données pédologiques*

— Le premier horizon du profil correspond à la « terre arable ». La semelle de labour est à 17 cm de profondeur, comme c'est le cas dans la plupart des sols que nous avons étudiés.

— La présence d'une couverture de gravillons, de graviers, de cailloux à la surface du profil s'explique de la manière suivante : la charrue remonte en surface des matériaux grossiers situés dans l'épaisseur de l'horizon et plus ou moins enrobés de terre fine. Sous l'action de la pluie, ces éléments commencent à être nettoyés; l'action gel-dégel va permettre ensuite la libération de toutes les fractions colloïdales ; le moindre coup de vent, survenant sur le sol sec balaie ces particules. L'abondance d'éléments grossiers lavés, à la surface des sols cultivés, est due à une action complexe où interviennent la charrue, l'eau, le gel et le vent (photo 2).

Ce point est très important, car lorsque cette couche d'éléments grossiers se

(1) Couleur au Code MUNSELL.

retrouve dans les sols forestiers, elle permet de tirer des conclusions certaines sur le caractère polyphasé des profils ; l'une des phases correspondant alors, avec certitude, à une période culturale.

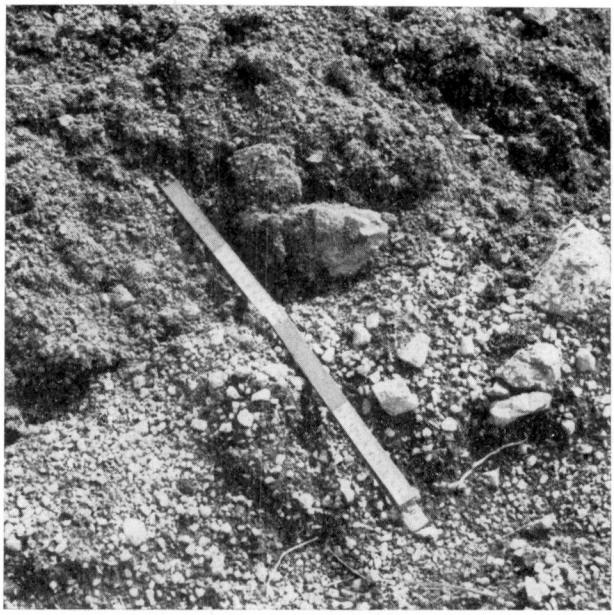


PHOTO 2. — *L'action de la pluie et du vent sur les cailloux.*

En haut, à gauche : Travail du sol récent ; les mottes de terre sont intactes ; les cailloux, recouverts de terre fine, sont peu visibles.

En bas, à droite : Travail du sol plus ancien (8 jours) ; les mottes ont été détruites par les intempéries. Les cailloux, lavés par les pluies, apparaissent nettement en clair.

— L'examen des courbes granulométriques (fig. 1) fait ressortir une grande analogie pour les éléments compris entre 2 000 μ et 20 μ.

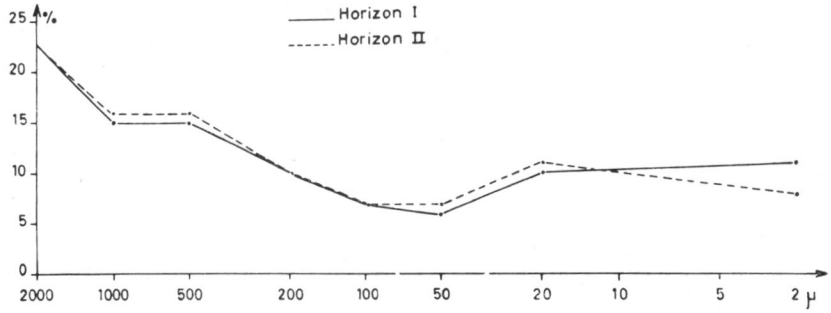


FIG. 1. — *Courbes granulométriques du profil de sol de la station 1*

Toutefois, l'examen détaillé des données de l'analyse granulométrique, rapportée dans le tableau 3, révèle une petite diminution du taux d'argile dans le second horizon ; cette diminution se retrouve dans de très nombreux sols de la Margeride ;

elle constitue un caractère classique de ces sols que DEJOU (1959) attribue à l'action directe de la végétation et de l'humus sur les constituants de l'arène granitique.

TABLEAU 3

Hor.	TF (%)	Sables grossiers (μ)			Sables fins (μ)		Limons (μ)		Argile (μ)
		2 000 1 000	1 000 500	500 200	200 100	100 50	50 20	20 2	< 2
I	55	23	15	15	10	7	6	10	11
II	45	23	15	16	10	7	7	11	8

— La structure fragile du profil est due à la prédominance des éléments grossiers et à la présence de colloïdes en quantité insuffisante (argile = 10 à 11 p. 100 ; matière organique = 3 p. 100).

— Les taux de matière organique ne sont pas élevés, mais ils sont normaux pour une terre de culture (DUCHAUFOUR, 1960). Il faut rappeler que les terres de la Margeride reçoivent des fumures organiques (fumier de bovin) en quantités non négligeables. La minéralisation de cette matière organique est rapide, ce qui ressort du C/N assez bas ; l'humus, malgré un pH assez faible, est donc un *Mull typique de culture.*

— Pour le premier horizon, la capacité d'échange est faible, ce qui est à rapprocher de la pauvreté en colloïdes. Le rapport Ca/Mg ($\simeq$ 1,6) est un peu faible ; le rapport Mg/K ($\simeq$ 2) est franchement faible. Néanmoins, le taux de saturation (33 p. 100) est relativement élevé pour les sols de cette région. Ces rapports, comme le taux de saturation, sont légèrement plus faibles dans le second horizon.

Les teneurs en Ca^{++} et K^{+}, plus élevées dans le premier horizon, peuvent être attribuées à la fertilisation (engrais triple).

En résumé, du point de vue fertilité, on est en présence d'un sol oligotrophe, peu saturé, légèrement amélioré par suite d'une fertilisation récente.

En conclusion : les caractéristiques texturales, structurales et physico-chimiques de ce sol conduisent à considérer le premier horizon comme un A et, le second, comme un C ; le profil se présente donc sous la forme :

A — C

Il s'agit d'un sol brun oligotrophe, de tendance xéromorphe, uniformisé par la culture.

Nous l'appellerons : *Sol brun de culture.*

3. *La végétation*

Lors de l'enquête sur le terrain, la parcelle étudiée, très récemment plantée en Épicéa, se présentait comme une jachère cultivée (photo 1).

La végétation couvrait environ 20 p. 100 de la surface du sol ; elle comportait

13 espèces, y compris l'essence de reboisement, *Picea excelsa* (LAMK.) LK, réparties dans les groupes suivants (1).:

Remarque : selon leur densité, les espèces sont qualifiées de :

très abondantes.....	s'il y a plus de 1 200	pieds à l'are
abondantes	s'il y a de 250 à 1 200	pieds à l'are
assez rares	s'il y a de 20 à 250	pieds à l'are
rares	s'il y a de 12 à 20	pieds à l'are
très rares	s'il y a moins de 12	pieds à l'are

Espèces indicatrices de l'état pastoral.

Holcus mollis L. (très abondant et recouvrant 10 p. 100 de la surface du sol).

Espèces suggérant l'acidité du sol et son manque de fertilité.

Rumex acetosella L. (très abondant et recouvrant 7 p. 100).
Galeopsis tetrahit L. (très rare).
Silene inflata vulgaris GAUD. (très rare).

Espèces suggérant le caractère meuble du sol, au moins en surface (10 à 15 cm).

Conopodium majus (GOUAN) LORET et B. (rare).
Viola tricolor L. (rare).

Espèces indicatrices des conditions de sécheresse relative du sol.

Spergula arvensis L. (très abondante, recouvrant 2 p. 100).
Scleranthus perennis L. (assez rare).
Teesdalea nudicaulis (L.) R. BR. (rare).
Arnoseris minima K. (assez rare).

Espèces messicoles subsistant, malgré les façons culturales, et provenant du stade antérieur.

Anthemis arvensis L. (rare).
Centaurea cyanus L. (très rare).

4. *Interprétation phyto-dynamique*

Compte tenu de la liste floristique du paragraphe précédent, et de ce que l'on sait de la composition floristique d'autres stades de végétation, celui-ci peut être interprété de la façon suivante.

La jachère travaillée, sur laquelle a porté notre enquête, a été précédée d'une moisson ; deux espèces, *Anthemis arvensis* et *Centaurea cyanus*, en témoignent. La présence, en quantité notable, de *Holcus mollis* révèle que la parcelle a ensuite été abandonnée, et cela, depuis au moins un an ; pendant ce laps de temps, elle a été pâturée et envahie par *Holcus mollis*. Le labour récent n'a pas été suffisant pour éliminer cette espèce.

Si la jachère pâturée à *Holcus mollis* n'avait pas été labourée, et si le pâturage avait été maintenu, la parcelle, comme il s'agit d'un sol xéromorphe, aurait été colonisée très lentement par *Cytisus purgans*. Dans le cas où, après l'abandon, et

(1) L'interprétation des relations végétation-sol est en cours sur un ensemble de plus de 100 relevés détaillés de la Margeride.

avant l'envahissement par le *Cytisus purgans*, le pâturage eût cessé, on aurait assisté à un envahissement rapide de la parcelle par *Pinus silvestris* car des semenciers existent à proximité de la parcelle. Cette conclusion a été confirmée par l'observation d'autres parcelles récemment colonisées par le Pin sylvestre, par semis naturel ; cinq ans après l'abandon de la culture, la densité y était de 75 000 plants à l'hectare ; après 10 ans, on en comptait encore 50 000.

B. — Station 2 — Perchis de Pin sylvestre

La station 2 est située dans le Gévaudan, à 6 km à l'ouest de Saint-Amans, à une altitude voisine de 1 050 m. Elle est en terrain plat, mais protégée, à l'Ouest, par une futaie élevée de Pin sylvestre.

1. *Le sol*

— Sur une tranchée, on peut distinguer quatre horizons : le premier, d'épaisseur variable, mais en moyenne de 3 cm, le second de 3 cm à 4 cm, le troisième de 4 cm à 22 cm et le dernier à partir de 22 cm.

— La surface du profil est recouverte d'une litière d'aiguilles ; le plancher du second horizon est séparé du toit du troisième par une couche de graviers, gravillons et petits cailloux bien lavés et nus. Ces matériaux ont un aspect poli ou, du moins, brillant.

— Les trois premiers horizons ont une consistance lâche et tendre ; par contre, le quatrième est dur et massif ; il doit être attaqué à la pioche. Les racines, rares ou inexistantes dans les deux premiers horizons, deviennent très abondantes dans le troisième, et sont presque totalement absentes dans le dernier.

— L'horizon supérieur est brun grisâtre très foncé (10 YR 3/2) ; le troisième et le quatrième sont brun jaunâtre (10 YR 5/4).

— La texture est très variable ; au-dessus du lit de cailloux, il n'y a aucune fraction minérale dans les horizons ; le premier horizon est constitué en effet d'aiguilles de Pin sylvestre, intactes à la partie supérieure, en voie de décomposition dans la partie inférieure. Le second est constitué de matière organique plus ou moins décomposée.

— Par contre, les deux horizons inférieurs sont très grossiers puisque l'horizon III comporte 40 p. 100 de graviers de plus de 0,5 cm de diamètre et l'horizon IV, 90 p. 100.

— La structure du premier horizon est difficile à dénommer ; elle est élémentaire, chaque élément étant une aiguille. La structure du second est finement feuilletée, celle du troisième fortement particulaire, et celle du quatrième massive.

— Le sol est sec et bien drainé.

— La matière organique forme la quasi-totalité des deux premiers horizons ; dans le premier, les débris végétaux (aiguilles de Pin, Mousses) sont très peu altérés. Dans le second, on peut observer une fermentation nette de ces organes ; cet horizon présente un feutrage de mycélium.

Dans l'horizon III il y a encore 4 p. 100 de matière organique qui a un C/N de 19.

— L'ensemble du profil est acide (pH = 4,5 pour tous les horizons). La capacité d'échange de l'horizon exploité par les racines (le troisième) est de 11,5 méq/

100 g. Les valeurs des cations échangeables de cet horizon sont indiquées dans le tableau 4 ci-après.

TABLEAU 4

	T	Na	K	Ca	Mg	S	S/T
Horizon III...	11,5	0,14	0,14	0,25	0,20	0,73	6,6 %

2. Interprétation des données pédologiques

— La couche de graviers bien lavés entre le plancher de l'horizon II et le toit de l'horizon III, est identique à celle qui a été observée à la surface de la terre de culture précédemment décrite. De plus, l'horizon III est comparable, au point de vue structure et consistance, à l'horizon I du sol de culture ; de même, l'horizon IV du présent profil est à rapprocher de l'horizon II du profil de la station 1.

— L'examen des teneurs des différentes fractions granulométriques de la terre fine, figurées dans le tableau 5 ci-après, conduit à qualifier la texture de l'horizon III d'argilo-sablo-limoneuse.

TABLEAU 5

Hor.	TF (%)	Sables grossiers (μ)			Sables fins (μ)		Limons (μ)		Argile (μ)
		2 000 1 000	1 000 500	500 200	200 100	100 50	50 20	20 2	< 2
III.....	30	17,4	10,8	7,7	7,5	12,3	16,7	12,7	11

La forte teneur en matière organique de l'horizon II (15 p. 100) permet de l'appeler « humus », sans qualification concernant le squelette minéral. De même, l'horizon IV, avec 90 p. 100 de graviers, peut être qualifié de « graveleux » (HÉNIN, 1960).

— La structure fragile des agrégats dans l'horizon II de ce profil est due au manque relatif des colloïdes et à la trop grande abondance d'éléments grossiers : 15 p. 100 de gravillons et 33 p. 100 de sable grossier dans la terre totale.

— L'examen de la structure des horizons organiques, rapproché de leur pH très bas, conduit à interpréter ces horizons comme constituant un *Mor imparfait* ou Syrosem, au sens de KUBIENA (1953).

— La capacité d'échange de l'horizon exploité par les racines (le troisième) est faible ; cela est dû au manque de colloïdes argilo-humiques.

Les différents ions échangeables ne sont pas en équilibre, puisque $Ca/Mg \simeq 1{,}2$ est un peu faible, et $Mg/K = 1{,}4$ tout à fait insuffisant.

Le complexe absorbant est très désaturé (6,6 p. 100). On peut apprécier le contraste, notamment en ce qui concerne les alcalino-terreux, avec les données du profil de la station 1.

Il s'agit donc d'un sol oligotrophe, très désaturé.

En conclusion : ce profil est complexe ; on peut y distinguer deux sols superposés d'origine différente :

— Le *premier*, d'origine forestière, et pour lequel on peut établir les diagnostics suivants :

I	II	III	IV
—	—	—	—
A_{00}	A_{01}		
A_0		D_1	D_2

est un sol de type A_0-C, où A_0 est un Mor imparfait et où III et IV jouent le rôle de « roche support ». Nous l'appellerons donc (KUBIENA, 1953) :

Ranker à Mor imparfait.

— Le *second*, qui commence sous la couche de graviers nus, et pour lequel on peut faire le diagnostic suivant :

III	IV
—	—
A′	C'_0

est plus ancien. C'est un sol hérité d'une phase culturale, du même type que celui qui a été décrit précédemment (station 1) ; on peut donc l'appeler :

Sol Brun de culture.

Il s'agit, par conséquent, au total, d'un sol polyphasé, comportant un sol actuel forestier et un sol hérité cultivé ; ce sol peut être symbolisé par la notation suivante :

$$A_0 - A' - C'_0$$

3. *La végétation*

Le peuplement examiné présente deux strates : une strate haute (4 à 8 m) uniquement de Pin sylvestre et une strate basse (0-5 cm) herbacée et muscinale, qui ne recouvre que 1 p. 100 de la surface.

La strate haute (Pin sylvestre).

Elle comporte, sur 100 m², 250 tiges, dont seulement 160 sont vivantes, ce qui correspond à une densité de 16 000 tiges/ha (photo 3).

Ces arbres ont 20 à 25 ans ; les plus gros ont un diamètre de 10 cm à 1,30 m, mais la moyenne n'est que de 5 cm, ce qui correspond à un accroissement radial annuel de l'ordre de 0,25 mm.

La strate basse.

Espèces forestières.

Le reboisement entraîne l'apparition d'espèces forestières ; certaines d'entre elles sont liées, au moins localement, au Pin sylvestre :

Goodyera repens (L.) R. BR. (peu abondant).
Monotropa hypopitis L. (rare).

d'autres, appartiennent à la hêtraie :

Fagus silvatica L. (rares plantules).
Deschampsia flexuosa (L.) TRIN. (assez rare).
Hieracium murorum L. (rare).

PHOTO 3. — *Perchis de Pin sylvestre de la station 2*

Noter la densité très élevée de tiges à l'unité de surface, toutes celles que l'on voit sur le cliché sont vivantes.

d'autres encore sont dues à l'absence de luminosité, entraînée par la trop forte densité des Pins ; ce sont essentiellement des Mousses :

Amblystegium juratzkanum SCH.
recouvrant 1 p. 100 de la surface du sol).
Dicranum scoparium L. (peu abondant).
Pseudoscleropodium purum (L.) FLEISCH (assez rare).
Brachythecium rutabulum S. et S. (rare).
Hypnum cupressiforme L. (très rare).

Espèces des friches.

Parallèlement, on peut noter la disparition progressive des espèces des friches après l'installation du Pin ; il n'en reste en effet que quelques individus, dont :

Agrostis vulgaris WITH. (assez rare).
Achillea millefolium L. (rare).
Juniperus communis L. (très rares plantules).
Conopodium majus (GOUAN) LORET et B. (très rare).

4. *Interprétation phyto-dynamique*

Ce perchis de Pin a été précédé, il y a environ 25 à 30 ans, d'une culture ; cette culture a été abandonnée, puis la friche ainsi produite fut pâturée pendant un temps assez bref. En effet, les Pins ont pu s'installer en masse en un temps très court, ce qui n'aurait pas pu se produire dans une lande de *Cytisus purgans* ou de *Sarothamnus scoparius.*

De cette phase culturale, il subsiste deux témoignages :

— la présence de quelques espèces caractéristiques (*Agrostis vulgaris, Achillea millefolium*) ;

— et des traces dans le profil du sol, si nettes que le doute n'est pas permis.

La suppression rapide du pâturage permit l'installation du Pin en une période très brève, de l'ordre de 3 à 5 ans. A ce moment, les arbres étaient si serrés qu'aucun autre individu ne pouvait s'installer ; nous avons, en effet, examiné plusieurs stades intermédiaires entre celui que nous avons décrit et la friche, qui corroborent parfaitement ces affirmations.

Les Pins produisent une litière se décomposant très mal qui, dans l'ambiance confinée d'un tel peuplement, évolue en Mor, le sol de culture servant de roche-mère. Il y a donc production d'un *sol biphasé* (GÈZE, 1959) ; le changement de phase n'est pas dû à une modification climatique, mais à une modification des facteurs biotiques (influence de l'homme). Avec le Pin, et sur cet humus acide, s'installent les espèces acidiphiles compagnes de cette essence, ou appartenant au cortège caractéristique de l'étage de végétation.

Abandonné à lui-même (il n'y a eu aucune éclaircie depuis 25 ans) ce peuplement va évoluer, s'éclaircir naturellement, pour aboutir à la futaie de Pin sylvestre.

C. — STATION 3 — FUTAIE ÉQUIENNE DE PIN SYLVESTRE

La station 3 est située dans le Gévaudan, à 6 km environ au SW. de Saint-Amans, à une altitude de 1 200 m, sur un plateau de granite porphyroïde typique.

1. *Le sol*

— Le profil présente quatre horizons :

un horizon I, d'épaisseur variable, de 1 à 10 cm, en moyenne 4 cm.
un horizon II, de 2 cm d'épaisseur ;
un horizon III, de 18 à 20 cm d'épaisseur ;
un horizon IV, qui se poursuit en profondeur.

— Le premier horizon est constitué d'aiguilles de Pin dont l'accumulation au pied des arbres forme de petits cônes. Le second horizon comporte quelques rares graviers de quartz nus et bien lavés ; il est séparé du toit du suivant par une couche très nette de cailloux nus.

— Les trois premiers horizons ont une consistance friable ; le dernier, par contre, est dur. Les racines, inexistantes dans le premier horizon, sont abondantes dans les deux suivants, mais redeviennent très rares dans le dernier.

— L'horizon II est brun foncé grisâtre (10 YR 4/2), le suivant est brun (10YR 4/3) et le dernier brun jaunâtre (10 YR 5/6).

— En surface, le sol est très humifère. La fraction minérale est inexistante dans l'horizon I et très réduite dans l'horizon II ; mais dans l'horizon III, à partir du lit du cailloux, elle devient prédominante. Ce sol comporte une fraction très importante de graviers et de gravillons.

— L'horizon I a une structure élémentaire homogène, chaque élément est une aiguille ; les brindilles sont rares, de sorte qu'il a une tendance à être feuilleté. L'horizon II est grossièrement particulaire, l'horizon III est modérément polyédrique anguleux et l'horizon IV grossièrement particulaire.

— C'est un sol sec et bien drainé.

— La matière organique forme la totalité de l'horizon I et une part importante de l'horizon II. Dans le premier, les organes sont très peu altérés, alors que dans le second il n'est plus possible de reconnaître un organe quelconque ; la matière organique est complètement incorporée au sol. De l'horizon II à l'horizon III on passe brusquement d'un taux de matière organique de 15 p. 100 à un taux de 4 p. 100.

— L'acidité très prononcée en surface, est moins prononcée en profondeur (tabl. 6).

TABLEAU 6

Horizons	II	III	IV
pH	4,5	6	5,5

Le troisième horizon est le seul exploité par les racines ; il a une capacité d'échange de 8,4 méq 100 g, et un taux de saturation de 7,2 p. 100. Les valeurs des cations échangeables sont données dans le tableau 7 ci-après.

TABLEAU 7

	T	K	Na	Ca	Mg	S	S/T
III	8,47	0,12	0,14	0,25	0,10	0,61	7,2 %

2. *Interprétation des données pédologiques*

Le premier horizon du profil correspond à la litière ; son microrelief irrégulier (cônes au pied des arbres) dénote une accumulation et, par conséquent, reflète une minéralisation assez lente de la matière organique.

— La couche de graviers bien lavés entre les horizons II et III est très comparable à celle qui a pu être observée dans le cas précédemment étudié (station 2) ; elle a la même signification : elle correspond à la surface de l'ancienne terre de culture ; ceci est confirmé par l'épaisseur de l'horizon III, qui est celle de l'horizon cultural.

— Avec 65 p. 100 seulement de terre fine, ce sol a une texture grossière. Les différentes fractions granulométriques de la terre fine sont figurées dans le tableau 8 ci-après.

TABLEAU 8

Hor.	TF (%)	Sables grossiers (μ)			Sables fins (μ)		Limons (μ)		Argile (μ)
		2 000 1 000	1 000 500	500 200	200 100	100 50	50 20	20 2	< 2
II.....	75	19	13	12	7	5	6	11	12
III.....	61	22	16	13	8	5	7	14	11
IV.....	66	19	16	17	9	5	7	14	10

La teneur élevée en matière organique de l'horizon II (15 p. 100) permet de qualifier sa texture d' « humo-sablo-limono-argileuse » ; avec 4,2 p. 100 de matière organique l'horizon III est « sablo-limono-argilo-humifère », et l'horizon IV avec seulement 3,5 p. 100 est « sablo-limono-argileux » (HÉNIN, 1960).

On peut remarquer que les textures des trois horizons sont très voisines ; cela apparaît très bien sur les courbes granulométriques de la figure 2.

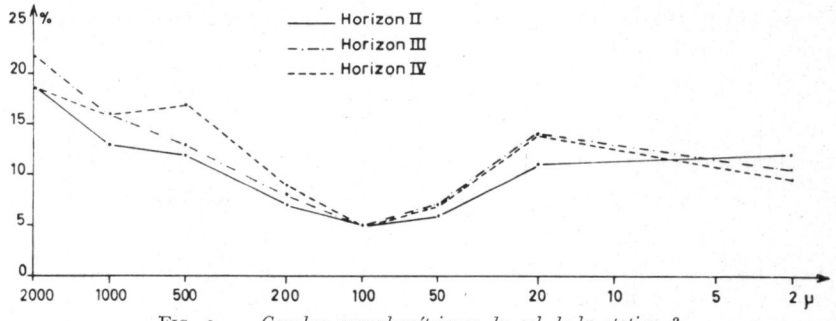


FIG. 2. — *Courbes granulométriques du sol de la station 3*

— La structure fragile des agrégats de l'horizon III est due à sa texture grossière, au manque de colloïdes et, en particulier, d'argile.

L'horizon IV est dur, bien que sa teneur en argile soit la même que celle de l'horizon précédent, parce que les fractions minérales n'y ont jamais été touchées

et sont restées dans leur position originelle, à l'intérieur du granite intact. C'est à proprement parler du « gore ». Par contre, l'horizon III a été labouré, ce qui a déplacé et brassé tous les éléments. D'autre part, il est vraisemblable que les argiles ne sont pas dans le même état dans les 2 horizons.

— Les deux premiers horizons organiques constituent un *Moder*. L'horizon I est constitué de litière ; l'horizon II est particulaire et riche en humus ; son C/N est égal à 20 et son pH est assez bas (4,5).

— La faible capacité d'échange de l'horizon nutritif (le troisième) est due au défaut de colloïdes argilo-humiques de ce sol.

Sauf en ce qui concerne le magnésium, les teneurs en bases échangeables sont très comparables à celles qui ont pu être observées dans la station précédente. Il en résulte un déséquilibre magnésio-potassique qui est encore plus prononcé ; en effet, si Ca/Mg = 2,5 est presque satisfaisant, Mg/K $\simeq$ 1 est, par contre, très faible. Il semble que cela puisse entraîner un déséquilibre nutritionnel préjudiciable à la végétation.

Il s'agit donc d'un sol oligotrophe très désaturé.

En conclusion, ce profil est complexe ; on peut y distinguer deux sols d'origines différentes.

— Le *sol actuel*, d'origine forestière, pour lequel on peut établir le diagnostic suivant :

I	II	III	IV
A_{00}	A_{01}	A_1	C_0

Il s'agit donc d'un *Sol Brun acide très jeune* (MANIL, 1954).

— Le *second*, hérité d'une période culturale, commence sous la couche de graviers nus ; les horizons permettent le diagnostic suivant :

III	IV
A′	C'_0

Ce second profil est un *Sol Brun de culture*, du même type que celui que nous avons décrit dans la première station.

3. *La végétation*

Le peuplement végétal comporte quatre strates :

strate arborescente	14 m environ
strate arbustive	0,5 à 1 m
strate herbacée	5 à 25 cm
strate muscinale	0 à 5 cm

La strate arborescente.

Cette strate est composée de Pin sylvestre d'environ 14 m de haut, ayant un diamètre de 15 à 25 cm à 1,30 m ; il y a environ 1 500 à 1 800 tiges à l'hectare.

Ces arbres sont mal venus et tordus ; le peuplement est ouvert et facilement parcouru par le bétail. C'est une forêt pâturée (photo 4).

Les strates inférieures.

Strate muscinale.

La strate inférieure, de 0 à 5 cm, comprend trois espèces de Mousses ayant un recouvrement de 75 p. 100.

Pleurozium Schreberii (WILLD.) MITT.
Dicranum scoparium L.
Hylocomium splendens HEDW.

PHOTO 4. — *Futaie de Pin sylvestre de la station 3.*
La densité initiale, le manque d'entretien influent sur le port des arbres ; ce peuplement typique est de peu de valeur. De tels peuplements sont pâturés l'été par des bovins.

Ces Mousses sont liées à la pineraie et, en particulier, à l'humus acide qu'elle produit.

Strates moyennes.

a) *Espèces forestières.*

Parmi les espèces composant les strates moyennes, certaines sont dues au milieu forestier : humus acide, ambiance « forestière »...

Fagus silvatica L. (0,25 m-20. ha)
Deschampsia flexuosa (L.) TRIN. (1 p. 100)

Hieracium murorum L. (assez rare)
Sorbus aucuparia L. (très rare)
Ilex aquifolium L. (plantules, très rare)

Ce sont des espèces très fréquentes dans les hêtraies de la région.

b) *Espèces de l'étage climatique.*

Ces espèces sont liées au climat froid et relativement humide de la région.

Vaccinium myrtillus L. (très abondant)
Rubus idaeus L.
Rubus hirtus WALDST. et K.
Veronica officinalis (L.) WIMMER

c) *Espèces pastorales.*

La pénétrabilité de la futaie permet au bétail d'y pâturer, ou de s'y abriter ; il en résulte un accroissement important du nombre des espèces des friches pâturées, par rapport au perchis dense de la station 2. On trouve ainsi :

Juniperus communis L. (1 m-100 pieds/are)
Sarothamnus scoparius (L.) WILLER (rare)
Holcus mollis L. (très abondant, recouvre 1 p. 100 de la surface du sol)
Agrostis vulgaris L. (abondant)
Hieracium pilosella L. (assez rare)
Silene inflata vulgaris GAUDIN (très rare)
Rumex acetosa L. (très rare)
Conopodium majus (GOUAN) LORET et B. (très rare)

4. *Interprétation phyto-dynamique*

Nous savons comment une terre de culture abandonnée se reboise spontanément en Pin sylvestre (cf. station 2).

Ce peuplement évolue assez rapidement ; les éclaircies, le plus souvent naturelles, entraînent une diminution de la densité du peuplement ; la pénétrabilité ainsi créée permet le passage du bétail et un retour progressif à l'état pastoral.

Le cortège floristique comprend donc, d'une part, des espèces forestières et, d'autre part, des espèces pastorales qui ont été énumérées ci-dessus.

La présence de quelques pieds de *Sarothamnus scoparius* parmi ces dernières indique que si le retrait du bétail, soixante ans plus tôt, avait été progressif, la lande qui aurait pris naissance aurait été une lande de Genêt à balai et non une lande de Genêt purgatif. Cela dénote localement un sol pénétrable aux racines et relativement bien approvisionné en eau.

Le retour du bétail dans ce peuplement forestier suggère quel sera son avenir. En effet, l'introduction des feuillus est définitivement empêchée par le pâturage car les Hêtres sont broutés et éliminés dès le stade « plantule » (ce que nous avons observé). Il n'y aura donc pas d'évolution vers la hêtraie ; bien au contraire, après la coupe des arbres qui surviendra dans quelques années, on remettra, pour un certain temps, cette parcelle en culture, comme cela se pratique traditionnellement dans la région.

D. — Station 4 — Vieux taillis de Hêtre

La parcelle étudiée se trouve dans la Margeride, à 3 km environ au SW de Saugues, sur le territoire de la commune de Chanaleilles ; elle est située à une altitude de 1 250 m, à mi-versant et en exposition NE ; sa pente est d'environ 12 p. 100.

1. *Le sol*

— Ce profil présente cinq horizons :

un horizon I formant une couche régulière de 1,5 cm d'épaisseur ;

un horizon II de 2,5 cm, séparé du suivant par une mince couche de graviers lavés ;

un horizon III de 5 cm ;

un horizon IV de 8,5 cm, passant sans transition au suivant ;

un horizon V qui se continue en profondeur.

— Les quatre premiers horizons sont friables, le dernier est plus consistant sans toutefois être aussi dur que dans les profils précédents.

— L'horizon II est brun rougeâtre foncé (5 YR 2/2), l'horizon III : brun très sombre (10 YR 2/2) ; l'horizon IV bien qu'un peu plus clair est encore brun très sombre (10 YR 3/3) ; enfin, l'horizon V est brun jaunâtre (10 YR 5/4).

— La texture est très variable ; l'horizon I, composé de feuilles ne comporte pas de fraction minérale. Alors que les horizons II et III ont une texture très fine, les horizons IV et V sont assez grossiers.

— L'horizon I est, par nature, feuilleté, mais il est à noter que les feuillets inférieurs, enveloppés de mycélium blanc, sont plus épais ; ils comportent plusieurs feuilles de Hêtre.

L'horizon II a une structure polyédrique subanguleuse très stable, mais très fine ; elle a une légère tendance à être particulaire.

L'horizon III est modérément polyédrique anguleux de stabilité faible.

La structure des horizons IV et V est, elle aussi, modérément polyédrique anguleuse ; la stabilité y est un peu plus grande.

— Le sol est assez sec et bien drainé ; le couvert végétal très dense et l'humus maintiennent cependant une certaine fraîcheur au profil.

— Le premier horizon est composé de feuilles de Hêtre ; dans sa partie supérieure ces feuilles sont intactes et libres les unes des autres, alors que dans la partie inférieure elles sont de plus en plus altérées et rassemblées en feuillets par un abondant mycélium blanc.

Les horizons inférieurs sont riches en matière organique (tabl. 9). L'horizon II a un C/N de 15.

TABLEAU 9

Horizons	pH	Taux de mat. org. en % de T.F.
II	4	22 (C/N = 15)
III	4,5	18
IV	5	9
V	5,5	5

— L'acidité des horizons diminue régulièrement de la surface vers la profondeur (tabl. 9).

— Le complexe absorbant n'a été analysé que sur l'horizon II, les valeurs observées sont consignées dans le tableau 10.

TABLEAU 10

Hor.	T	K	Na	Ca	Mg	S	S/T
II	24,2	0,60	0,13	1,80	1,30	3,83	16 %

2. Interprétation des données pédologiques

— La présence d'une couche de graviers nus entre les horizons II et III est l'indication d'une ancienne surface de sol cultivé ; la semelle de labour correspond au plancher de l'horizon IV ; en effet, l'épaisseur des horizons III et IV est de 14 à 15 cm, profondeur des labours dans la région ; d'autre part, ces deux horizons sont friables alors que le V est assez dur, ce qui est à rapprocher des consistances observées dans la terre de culture (station 1).

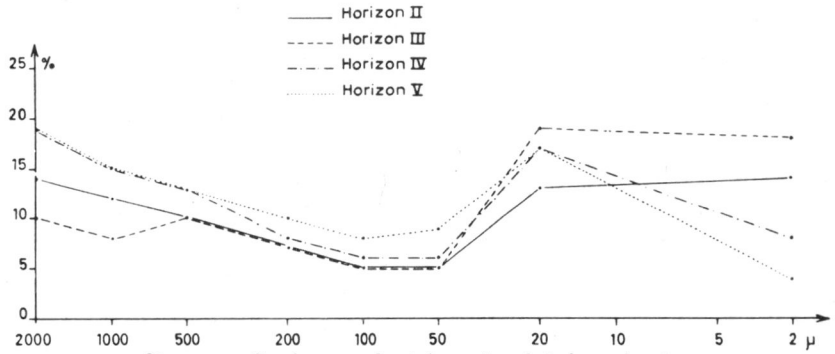


FIG. 3. — *Courbes granulométriques du sol de la station 4*

— La figure 3 montre que l'horizon III est plus fin que les autres ; elle montre aussi que la texture des différents horizons est tout à fait comparable, du moins entre 500 µ et 20 µ.

TABLEAU 11

Hor.	TF (%)	Sables grossiers (µ)			Sables fins (µ)		Limons (µ)		Argiles(µ)
		2 000 1 000	1 000 500	500 200	200 100	100 50	50 20	20 5	< 2
II	82	14	12	10	7	5	5	13	14
III	90	10	8	10	7	5	5	19	18
IV.....	78	19	15	13	8	6	6	17	8
V.....	75	19	15	13	10	8	9	17	4

L'horizon II est un humus argilo-sablo-limoneux, l'horizon III est humo-argilo-limono-sableux, l'horizon IV sablo-limono-argilo-humifère et l'horizon V sablo-limono-humifère, selon la nomenclature de HÉNIN (1960) (tabl. 11).

Si l'on tient compte de ce que l'horizon II est très riche en humus qui diminue sa densité apparente, on remarque que les horizons sont de plus en plus grossiers ; et que, par contre, le taux d'argile décroît.

La fragilité de la structure des divers horizons est due au taux important d'éléments grossiers et à la teneur relativement faible en éléments fins rapportés à la terre totale.

Horizons	Éléments grossiers (%) > 200 μ
II	47
III	35
IV	59
V	60

— L'horizon I est constitué de litière dont la partie inférieure est en fermentation (abondance des mycéliums) ; l'horizon II, dont la structure est polyédrique anguleuse peu stable, a un taux de saturation assez faible : 16 p. 100, un pH faible : 4, et un C/N moyen : 15 ; c'est donc :

un *Mull acide typique.*

L'horizon analysé (II) est un A_{01} ; on remarque son faible taux de saturation et la place relativement importante que tiennent les alcalino-terreux :

$$\frac{\text{alcalino-terreux}}{\text{alcalins}} = 4{,}24.$$

Cela est dû à une absorption préférentielle des alcalino-terreux par les arbres (selon MANIL).

En conclusion : du point de vue de la pédogenèse en cours on peut donner à chaque horizon la nature pédogénétique suivante :

I	II	III	IV	V
—	—	—	—	—
A_{00}	A_{01}	A_{11}	A_{12}	C_0

L'ensemble des caractéristiques pédogénétiques décrites ou analysées permet de classer ce profil dans la catégorie :

Sol Brun acide jeune oligotrophe.

Ce sol est établi sur un ancien *Sol Brun de culture.*

III IV	V
A′	C_0'

3. *La végétation*

Le peuplement végétal comporte deux strates : une strate arborescente et une strate herbacée avec quelques sous-arbrisseaux.

La strate arborescente.

Il s'agit d'un vieux taillis de Hêtre dont les rejets ont environ 6 m de haut et un diamètre moyen de 10 cm à 1,30 m de hauteur. Cette taille dénote une vigueur assez faible, soulignée par l'abondance de parasites foliaires (chenilles).

Il y a environ 1 200 souches à l'hectare, chacune portant une quinzaine de brins (de 7 à 20). Cet ensemble a un recouvrement de 100 p. 100 (couronnes) et un couvert angulaire, par feuillage dense, supérieur à 90 p. 100 ; il en résulte un appauvrissement très net de la végétation herbacée qui manque de lumière.

De loin en loin, dans la station, on peut noter la présence de quelques Sapins (*Abies pectinata* LMK.) de 8 m, sub-spontanés ; ces Sapins suggèrent la place de la station dans un bioclimat froid et relativement humide, seul capable de permettre ici le développement naturel de cette essence.

La strate basse.

La strate basse comporte 14 espèces ; sur cet ensemble, 5 seulement sont régulièrement réparties, les 9 autres se groupent dans les quelques petites clairières.

Espèces du Mull acide.

Certaines espèces sont, localement, caractéristiques du Mull acide de la hêtraie, ce sont :

Deschampsia flexuosa (L.) TRIN. (assez rare).
Maïanthemum bifolium (L.) SCHM. (très rare).
Anemone nemorosa L. (très rare).
Oxalis acetosella L. (très rare).
Galeopsis tetrahit L. (très rare).

Espèces mésophiles.

D'autres sont caractéristiques des milieux à tendance mésophile :

Vaccinium myrtillus L. (très abondant, recouvrant 1 à 2 p. 100 de la surface du sol).
Poa chaixii VILL. (assez rare).
Corylus avellana L. (très rare).
Digitalis purpurea L. (très rare).
Rubus idaeus L. (très rare).

Espèces pastorales.

Quelques espèces sont indicatrices d'une action pastorale (bovin) ; mais leur rareté montre que le bétail ne séjourne pas dans cette forêt ; il ne fait que passer (ce que nous avons d'ailleurs observé).

Stellaria holostea L. (rare).
Holcus mollis L. (rare).
Conopodium majus (GOUAN) LORET et B. (rare).
Galium hercinicum WEIGL. (très rare).

4. *Interprétation phyto-dynamique.*

Compte tenu de l'âge visiblement très élevé des souches qui ont subi plusieurs coupes (dont la dernière date de 1914), nous sommes amenés à penser que l'installation du Hêtre dans cette parcelle est très ancienne.

Il est possible de reconstituer l'histoire de la parcelle de la façon suivante. Après une série de phases culturales et de phases forestières (Pin sylvestre) alternées, de durée indéterminée, la parcelle a été abandonnée à elle-même (probablement au milieu du XIXe siècle). Les Pins se sont installés plus ou moins rapidement ; puis l'ambiance forestière ainsi constituée permit l'implantation du Hêtre qui finit par éliminer les Pins arrivés à maturité.

III. — ESSAI DE SYNTHÈSE PÉDOLOGIQUE ET PHYTOGÉOGRAPHIQUE

A. *Les sols*

La comparaison, même rapide, des divers types de sols de la série étudiée fait ressortir un certain nombre de caractères communs.

Il convient de souligner l'épaisseur à peu près constante, d'un point à l'autre de la région, de la couche arable : 14 à 20 cm. Dans tous les cas, c'est une couche meuble, surmontant un horizon de « gore » assez dur. Cette couche s'identifie facilement, même sous végétation forestière, ne serait-ce que par la présence d'une semelle de labour, à sa base, et d'un lit de graviers et de gravillons nus, à son toit.

Les diverses courbes granulométriques examinées montrent une grande similitude (fig. 1, 2, 3 et 4). En particulier le fléchissement entre 200 μ et 50 μ (fig. 4) est constant, avec des valeurs très voisines, d'un horizon à l'autre, et d'un profil à l'autre.

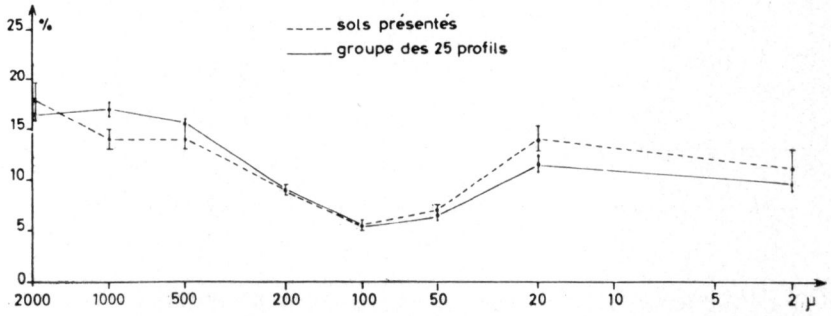


FIG. 4. — *Courbes granulométriques moyennes.*
Des sols présentés (ligne continue) ; de l'ensemble des sols étudiés (ligne pointillée).

Ce « creux granulométrique » a été retrouvé dans tous les sols granitiques de la région. Si l'on compare les 4 profils décrits à un ensemble de 25 autres cas étudiés en détail, on peut remarquer que les profils présentés sont moins grossiers que la

moyenne (tabl. 12), mais que la répartition des fractions « sable fin » et « limon grossier » est la même ; cela apparaît bien sur les courbes granulométriques de la figure 4.

TABLEAU 12

		Sables grossiers (μ)			Sables fins (μ)		Limons (μ)		Argile (μ)
		2 000 1 000	1 000 500	500 200	200 100	100 50	50 20	20 2	< 2
Groupe de 25 profils	$\overline{m}$	16,7	17,1	15,8	9,0	5,7	6,5	11,5	9,7
	σ	5,35	5,84	3,63	1,58	1,14	1,27	4,05	3,94
	$\sigma\ \overline{m}$	0,75	0,76	0,52	0,22	0,16	0,18	0,59	0,56
Sols présentés	$\overline{m}$	18,0	14,0	14,0	9,0	6,0	7,0	14,0	11,0
	σ	4,4	2,4	2,4	1,6	1,2	1,3	3,0	4,0
	$\sigma\ \overline{m}$	1,5	0,8	0,8	0,5	0,4	0,4	1	1,3

Cette forme de courbe se ne retrouve que dans les produits d'altération du granite porphyroïde. Il semble donc qu'il s'agisse là d'une caractéristique de son mode d'altération. Malheureusement, les auteurs qui ont étudié l'altération de ce type de roche (DEJOU, 1959 ; COLLIER, 1961), n'ont pas subdivisé les classes granu-

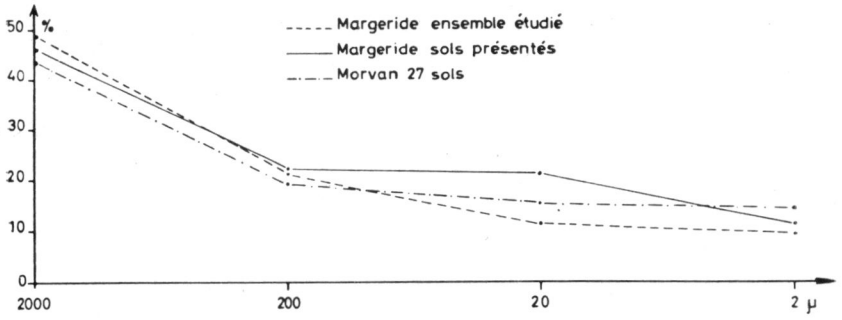


FIG. 5. — *Comparaison granulométrique des sols du Morvan et de la Margeride sur granite porphyroïde*

lométriques d'ATTERBERG. Néanmoins, la comparaison des résultats (fig. 5) obtenus dans le Morvan (DEJOU, 1959) avec ceux obtenus dans la Margeride, fait ressortir un certain parallélisme entre les courbes représentatives, qui paraît pouvoir confirmer cette hypothèse.

Du point de vue général, le produit d'altération est, soit une argile sablo-limoneuse, soit, le plus souvent, un sable limono-argileux, d'après le triangle de texture de HÉNIN (1960) (fig. 6).

Il convient de souligner que les divers horizons C, présentés dans ce travail, ont des taux relativement élevés de matière organique pouvant aller jusqu'à 3 p. 100. La présence de matière organique dans le « gore » a été signalée dans des études précédentes (DEJOU, 1959 et COLLIER, 1961) ; COLLIER mentionne ainsi les taux suivants :

Profondeur en mètres	Taux de M.O. en p. 100
0,08	5,1
0,16	1,4
0,40	0,4
5,00	0,2

qu'il attribue à la présence du système radiculaire ; cependant, nous n'avons pratiquement jamais rencontré de racines en dessous de 1 m. Si la libération sur place de matière organique par les racines mortes n'est probablement pas à rejeter, l'essentiel de la matière organique semble, cependant, provenir du sol et avoir été entraîné dans le « gore ». Cela reste à éclaircir par des recherches ultérieures.

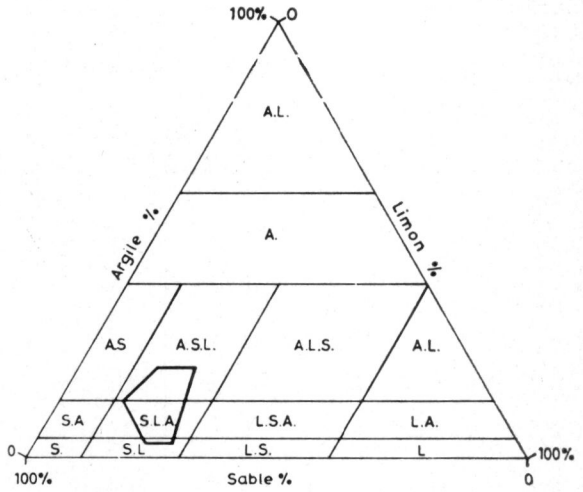


FIG. 6. — *Situation des horizons des sols étudiés dans le triangle de texture de* HÉNIN (1960).

L'application de la formule du drainage calculé de HÉNIN laisserait prévoir l'existence de sols podzoliques ; en effet, le drainage calculé est, pour la Margeride, de 430 mm ; or, les sols podzoliques prennent naissance dans les conditions où cet indice est supérieur à 200 mm.

L'absence de sols aussi évolués a conduit certains auteurs à considérer que la pédogenèse n'est pas perceptible dans cette région (MONTARLOT, 1951 ; COULET, 1952). Les exemples que nous avons exposés montrent qu'il n'en est rien, mais que, bien au contraire, il y a une évolution pédogénétique perceptible à l'échelle humaine.

L'évolution des sols est mise en évidence par celle de la matière organique, reflet des conditions générales du milieu (MANIL, 1958). Dans l'horizon A qui apparaît dès l'implantation de la végétation forestière, le C/N est d'abord très élevé (de l'ordre

de 30 à 35 sous une pineraie de 10 à 15 ans par exemple) ; puis sa valeur décroît progressivement, à mesure que le peuplement vieillit et s'ouvre. Il est encore de l'ordre de 18 en peuplement mixte Hêtre-Pin sylvestre, pour atteindre 15 sous peuplement évolué de Hêtre.

On retrouve une évolution de même tendance en ce qui concerne la structure de l'horizon qui a été labouré, ainsi que pour le pH et le taux de saturation, mais d'une façon moins nette.

Il s'agit là d'un point important du dynamisme pédologique dans la Margeride sur lequel nous nous réservons de revenir.

Le Sol Brun de culture modelé par les pratiques culturales (labours, façons superficielles, fumures, etc.) est de type A-C. Lors du reboisement, il sert de « support » pour le Ranker à Mor imparfait produit par la végétation forestière initiale. Ce Ranker est donc de type A-D, où D représente le support du Ranker à Mor imparfait ; ce support est constitué par la totalité du Sol Brun de culture de la phase précédente (fig. 7) ; il est d'abord indépendant du sol organique qui le surmonte puis est progressivement repris par la pédogenèse. En définitive, dans la hêtraie, les horizons A et (B) du Sol Brun acide comprennent la totalité des horizons humifères forestiers et de l'ancien sol de culture.

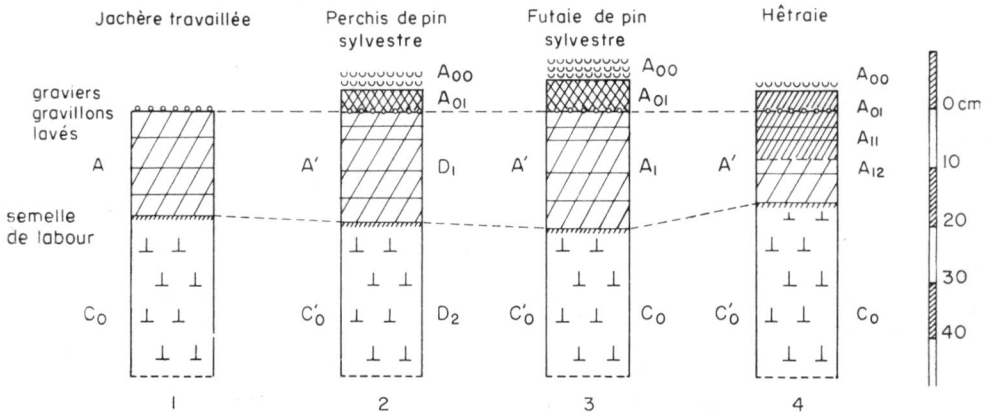


FIG. 7. — *Schématisation des profils des stations étudiées.*
(Les profils sont représentés selon la figuration de Ph. DUCHAUFOUR, 1960).

1. Sol Brun de culture.
2. Ranker à Mor imparfait sur Sol Brun de culture.
3. Sol Brun acide très jeune sur sol Brun de culture.
4. Sol Brun acide jeune à Mull acide sur Sol Brun de culture.

A_{00} Litière.
A_{01} Horizon organique.
A_{01} Horizon éluvial.
A_{11} Horizon éluvial riche en M.O.
A_{12} Horizon éluvial pauvre en M.O.
A' Horizon éluvial du sol de culture.
C_0 Roche-mère altérée (gore).
C_0' Roche-mère du sol de culture (gore).
D_1 Support superficiel.
D_2 Support profond.

Les profils décrits sont toujours composés d'une superposition de deux sols, formés sous le même climat, par des végétations différentes (fig. 7). On observe ainsi un *sol actuel*, plus ou moins évolué, sous la dépendance de la *végétation actuelle* ; mais aussi un sol dû à une végétation et à des conditions disparues. Ce dernier sol est encore « utilisé » par la végétation ; il intervient par ses propriétés physico-

chimiques ; il est cependant de plus en plus masqué par la nouvelle évolution : c'est un sol *hérité*. L'ensemble constitue un *sol polyphasé* (GÈZE, 1959).

Nous proposons ainsi une extension des notions de « phases » et de « sols hérités » initialement créées à propos de l'influence des seuls facteurs climatiques, aux facteurs biologiques, en nous appuyant sur le fait que le climat n'est pas le seul facteur de la pédogenèse qui soit susceptible de modifications se répercutant sur l'évolution du profil.

B. *L'utilisation du sol par l'Homme et l'évolution du couvert végétal*

L'évolution du couvert végétal a été esquissée au cours de la présentation analytique ; il est possible de la préciser.

A l'origine, et jusqu'au milieu du XIXe siècle, la pression humaine dans le Massif de la Margeride était suffisamment importante pour que tout ce qui était cultivable fut exploité par l'Homme (FEL, 1962) ; du moins, avec certitude, en ce qui concerne les sous-régions du Gévaudan et du plateau oriental de la Margeride. L'agriculteur pratiquait plus ou moins volontairement, une rotation « *culture-friche pâturée-forêt* », analogue à celle que l'on retrouve dans le Velay (d'ALVERNY, 1907 ; GUINIER, 1956 ; CARLES, 1957) et dans quelques autres régions pauvres.

Depuis la fin du XIXe siècle, la population diminuant de façon très sensible, de nombreuses surfaces furent abandonnées. La disparition totale de la transhumance ovine accéléra la dépopulation ; en effet, les troupeaux transhumants contribuaient à la fertilisation des champs, ce qui maintenait les rendements à un niveau acceptable. La perte de cette « fumature » entraîna une baisse des rendements incompatible avec une agriculture de plus en plus exigeante.

Toute surface nue abandonnée ne peut se reboiser spontanément en Hêtre parce que cette essence forestière exige un certain couvert pour se développer. Par contre, le Pin sylvestre, essence de lumière par excellence, et qui est en outre dynamique, plastique et très prolifère, possède toutes les particularités qui lui permettent de s'installer chaque fois que la pression humaine ou animale se relâche ; d'où la très grande importance du Pin sylvestre dans le paysage rural actuel. D'autre part, la croissance relativement rapide de cet arbre lui permet d'arriver à maturité pendant la longue « jachère » (50 à 60 ans), ce que ne pourrait faire un feuillu, et le Hêtre en particulier.

Il est néanmoins incontestable que le Pin sylvestre occupe dans le paysage margeridien (au sens large) la place du Hêtre ; en effet, dès que la pineraie est suffisamment âgée pour créer une ambiance forestière, apparaissent, comme nous l'avons montré à propos de la 3e station, les espèces compagnes du Hêtre. Celui-ci tente même de s'installer, mais difficilement en raison d'une part, de l'éloignement des semenciers et, d'autre part, de sa faible vitesse de croissance qui ne lui permet pas d'échapper à la dent du bétail (cette action est très importante dans les forêts de la région qui sont pratiquement toutes pâturées ou, pour le moins, régulièrement parcourues par le bétail).

Il existe cependant quelques parcelles épargnées, et nous avons pu en étudier une à l'ouest du Gévaudan (à 3 km au SW du Buisson, 13 km au SSW d'Aumont-

Aubrac). Cette parcelle comporte un mélange de structure assez complexe entre le Hêtre et le Pin sylvestre.

Strates	Espèces	Abondance tiges/ha	Recouvrement des frondaisons (%)
16 -32 m	*Pinus silvestris*	700	40
8 -16 m	*Fagus silvatica*	300	7
4 - 8 m	*Fagus silvatica*	900	3
0,5- 1 m	*Fagus silvatica*	1 100	2
5 -25 cm	*Fagus silvatica*	800	1
5 -25 cm	*Pinus silvestris*	100	1

Bien entendu, « le Pin n'a pas attendu l'implantation de l'homme pour faire son apparition dans le Massif Central » (FEL, 1962). L'étude des tourbières a montré qu'après une période pendant laquelle cet arbre était prépondérant (la 4e des phases de l'évolution forestière, définies par LEMÉE,(1956), correspondant au refroidissement post-Alleröd), son taux est passé de 50 p. 100 à moins de 5 p. 100 ; la recrudescence actuelle (80 p. 100) est d'origine historique (LEMÉE, 1955, 1956).

Il paraît donc possible d'affirmer que le « *pseudo-étage* » *de végétation du Pin sylvestre n'est qu'un aspect transitoire de l'étage du Hêtre.* Dans le massif de la Margeride, partout où la pression humaine et animale se relâche, et où existent encore des semences, le *Hêtre peut s'installer.*

Nous n'avons pas parlé, à dessein, des landes à Genêts, nous réservant de revenir ultérieurement sur ces types de végétation.

C. *Les rapports Sol/Végétation*

On observe une succession dynamique des divers modes d'occupation du sol par la végétation depuis le pseudo-équilibre de l'état cultural jusqu'à l'équilibre du climax-climatique, au sens d'EMBERGER. Parallèlement, on peut observer une succession logique des divers types de sol.

Dans la série que nous avons choisie 6 stades peuvent être distingués, ce sont :

1. État cultural.
2. Jachère herbeuse pâturée.
3. Semis de Pin sylvestre.
4. Peuplements divers de Pin sylvestre.
5. Peuplement mixte de Pin sylvestre et de Hêtre.
6. Forêt de Hêtre.

1. *État cultural.*

La végétation est essentiellement soumise à l'action humaine. Le sol est artificiellement maintenu dans un état déterminé : Sol Brun de culture Mull à typique (brun anthropomorphe de DUCHAUFOUR, 1960).

2. *Jachère herbeuse pâturée.*

Au moment de l'abandon de la culture, la végétation couvre progressivement la surface de façon homogène par des espèces caractéristiques de l'influence pasto-

rale. Le sol s'acidifie et commence à évoluer ; il s'agitd'un Sol Brun de culture à Mull plus ou moins acide.

3 et 4. *Pineraie.*

Si l'on supprime l'influence pastorale, le Pin sylvestre s'implante, produit un humus brut acidifiant. L'évolution du sol s'accélère et se complique ; on obtient des sols biphasés ; ce sont d'abord des Rankers à Mor imparfait ; puis, lorsque la forêt s'ouvre à l'action de la lumière et des facteurs climatiques, des Sols Bruns acides jeunes à Moder.

5. *Pineraie-Hêtraie.*

Si le bétail épargne la parcelle, le Hêtre peut s'y introduire et s'y développer ; il occupe alors une place de plus en plus importante, aux dépens du Pin. Le sol est alors de type Brun acide à Moder plus doux.

6. *Hêtraie.*

Finalement, le Hêtre élimine presque totalement le Pin. Le sol est de type Brun acide à Mull acide.

IV. — CONCLUSIONS

Au terme de cette étude, qui ne présente qu'un premier échantillonnage des résultats des recherches poursuivies, se dessinent quelques conclusions générales concernant la pédogenèse et le dynamisme de la végétation sur les granites de la Margeride.

La plupart des sols forestiers sont constitués de deux phases : un sol hérité, d'origine culturale et de type Brun de culture, et un sol actuel dont l'état d'évolution est sous la dépendance de l'évolution du peuplement végétal qu'il porte.

Ainsi, si l'on prend comme point de départ le Sol Brun de culture, l'installation naturelle du Pin sylvestre détermine la production d'une litière qui se décompose en donnant en premier lieu un sol organique, plus exactement un Ranker à Mor imparfait ; puis, avec le vieillissement du peuplement, les horizons organiques évoluent et influencent le sol de culture pré-existant ; le résultat est la formation d'un Sol Brun acide très jeune à Moder. A ce stade d'évolution deux voies sont possibles : si le peuplement forestier est défriché, les horizons supérieurs du sol sont mélangés par suite des façons culturales, il y a notamment enfouissement de matière organique ou d'engrais, et l'on revient au Sol Brun de culture ; ou bien, le peuplement forestier continue à évoluer, et sous l'action des feuillus qui prennent la place des résineux, l'humus devient un Mull acide caractéristique du Sol Brun acide de la futaie climacique de *Fagus silvatica* de ces régions.

En ce qui concerne la signification phytogéographique des peuplements naturels de Pin sylvestre, il apparaît nettement que la grande abondance de cette essence dans le paysage agricole de la Margeride, loin de suggérer un « climax » ou un étage,

n'est que le reflet d'un état temporaire et instable, dû à des conditions aussi bien historiques que techniques. En réalité, la presque totalité du massif de la Margeride appartient à l'étage de végétation du Hêtre (climax climatique).

Reçu pour publication en octobre 1965.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE ECOLOGICAL STUDY OF THE MARGERIDE MASSIF

The Margeride and Gévaudan areas form the Margeride Massif (Massif Central, France). After having been relatively populated and cultivated, these areas saw their population decrease rapidly ; this resulted in a neglect of the land which then repopulated itself naturally with *Pinus silvestris*

The authors study four characteristic stages of this evolution on porphyroidic granite ; they describe the soil and vegetation, and attempt to give a dynamical explanation for it.

The forest soils are always constituted of two phases : an inherited soil of the cultivated brown soil type and the present soil for which the evolution stage depends on the age of the vegetal population ; under a young pole wood population of *P. silvestris* one thus find a Ranker with uncompleted mor, under a fullgrown forest of the same age a young acid Moder brown soil, and under an old population of beechtrees, an acid brown earth with an acid mull.

The authors propose to extend the notions of « phases » and « inherited » soil initially created in regard of the influence of the sole climatic factors, to the biological factors which are responsible for the evolution of the profile.

They indicate how to recognize locally the culture phases under the present forest cover.

They also give the proof of a pedogenesis on the porphyroidic granite of the Margeride which had already been treated in previous studies.

Concerning the vegetation, the authors describe the most important stages which follow the abandon of the cultivation ; the first stage, of a pasture character, is a turf of *Holcus mollis* ; on this turf, if there is no pasturing *Pinus silvestris* sows itself spontaneously and gives a very dense pole forest (over 70 000/hect.). In due course this forest grows into a full grown forest of equian *P. silvestris* ; then, as a result of the forest environment thus created, the beechtree moves in and little by little replaces the pinetree.

The authors then conclude by placing the « pseudo-stage » with *Pinus silvestris* in the beechtree stage.

They insist upon the preponderant part played by the human and animal influence in the dynamical process of the vegetation in this area.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM EKOLOGISCHEN STUDIUM DES MARGERIDE-GEBIRGES

Die Gegenden der Margeride und des Gévaudan bilden das Margeride-Gebirge (frz. Zentralgebirge). Ehedem sehr bevölkert und genutzt, sank die Bevölkerung dieser Gegenden in jüngster Zeit rasch ab ; so wurde das Land verlassen und an Stelle der Kulturen entstanden natürliche Kiefernwaldungen.

Die Autoren untersuchen vier charakteristische Stationen dieser Evolution auf porphyroidem Granit ; sie beschreiben Boden und Vegetation mit Versuch einer dynamischen Auslegung.

Die Waldböden bestehen jeweils aus zwei Phasen : ein ererbter Boden, vom Typus Kultur-Braunerde und der heutige Boden, dessen Evolutionszustand vom Alter des Pflanzenbestands abhängt. Unter den jungen Kiefernstangen findet man einen Ranker mit unvollkommenem Mor, unter gleichaltrigem Hochwald eine junge, saure Moder-Braunerde, während sich unter altem Buchenbestand eine saure Braunerde mit saurem Mull befindet.

Die Autoren schlagen vor, die Begriffe « Phasen » und « ererbte Böden », die ursprünglich für den Einfluss der klimatischen Faktoren geschaffen wurden, auf die biologischen Faktoren, die für die Evolution des Profils verantortlich sind, auszudehnen.

Sie geben die Art lokaler Erkennung der Kulturphasen unter der jetzigen Forstbedeckung.

Sie bringen auch den Beweis einer Bodenbildung auf dem porphyroiden Granit der Margeride die schon in vorhergehenden Studien in Angriff genommen wurde.

Was nun die Vegetation betrifft, so beschreiben die Autoren die wichtigsten Stadien, die sich nach Aufgabe der Kultivierung folgen : das erste Stadium, mit Weidecharakter, ist ein Rasen mit *Holcus mollis* ; darin gehen spontan, sofern keine Weidewirtschaft erfolgt, *Pinus silvestris* auf um einen sehr dichten Stangenwald zu geben (über 70 000/Ha) Dieser wandelt sich mit der Zeit in gleichaltrigen Hochwald, darin sich die Buche einfindet, die nach und nach die Kiefern verdrängt.

Die Autoren setzen die « Pseudo-Stufe » von *Pinus silvestris* in die Stufe der Buche eine.

Sie unterstreichen besonders die hervorragende Rolle des menschlichen und tierischen Einflusses in das dynamische Geschehen der Vegetation dieser Gegend.

К изучению массива Маржерид.

Г. ЛОНГ и П. ДАЙКЭ.

РЕЗЮМЕ

Районы Маржерид и Жеводан составляют массив Маржерид (Центральный Массив Франции.) Районы эти, вначале достаточно заселенные и хорошо обрабатывавшиеся, стали быстро терять свою заселенность; земли были покинуты и произошло натуральное сосновое облесение.

Авторы изучили четыре характерные фазы этой эволюции на порфироидном граните : они описывают почву и растительность и приводят динамичные об'яснения.

Лесные почвы представляют всегда две фазы : *наследственная почва* типа обработанного бурозема и *современная почва*, эволютивное состояние которой, зависит от возраста растительного покрова; под сосновыми шестами обыкновенно находится *Ранкер с грубым незаконченным гуммусом*, под строевым сосновым лесом можно опознать *молодой кислый бурозем с промежуточным гуммусом*, между-тем как под старыми буковыми насаждениями находится *кислый бурозем с кислым Мулем*.

Авторы предлагают распространить понятия « фазы » и « наследственная почва» применявшиеся вначале только по отношению к факторам климатического характера, на биологические факторы, ответственные за эволюцию почвенных профилей.

Они указывают также способ распознавания на местах различных фаз окультуривания под современным лесным покровом.

И, наконец, авторы представляют доказательства почвообразования на порфироидных гранитах Маржерид, подготовлявшиеся их прежними работами.

Что-же касается растительности, авторы описывают главные стадии следовавшие за прекращением обработки почв : первая стадия пасторального характера — дернина из бухарника (Holcus mollis); при отсутствии фазы пасторальной обработки, сосна насаждается на этой дернине сама — собой, образовывая густой молодняк (более 70.000 стволов/га) : по мере старения этого насаждения, оно превращается в строевой сосновый лес, и затем, создавшаяся таким образом лесная среда вызывает появление бука, который наконец окончательно вытесняет сосну.

Таким образом, в заключение, авторы помещают сосновый « псевдоэтаж» во внутрь букового этажа, отмечая при этом, главенствующую роль влияния человека и животных в динамическом процессе растительности этого района.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

d'ALVERNY A., 1907. Les hautes chaumes du Forez. *Rev. Eaux et Forêts*, nº 46.

CARLES J., 1951. Feuille 59 : Le Puy. Carte de la végétation de la France au 1/200 000. *C. N. R. S.*, Paris-Toulouse.

CARLES J., 1956. Notice détaillée de la feuille 59, Le Puy, de la Carte de la Végétation de la France au 1/200 000. *Service de la Carte Phytogéographique*, Série A, Carte de la Végétation, t. I, fasc. 2, 51-120.

COLLIER D., 1961. Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré. *Ann. agron.*, **12**, 273-331.

COULET E., 1952. Contribution à l'étude morphologique de la Margeride. *Bull. Soc. Langu. Géogr.*, **23**, 201-334.

DEJOU J., 1959. Étude comparative des phénomènes d'altération sur granite prophyroïde de Lormes et sur anatexistes à cordierites du Morvan-Nord et des sols qui en dérivent. *Ann. agron.*, nº hors série, 159 p.

DUCHAUFOUR Ph., 1960. *Précis de pédologie*. Édit. Masson et Cie, Paris, 1 vol.

FEL A., 1953. Notes de géographie humaine sur la montagne de la Margeride. *Mélanges géographiques*, Institut géographique de Clermont-Ferrand, 71-82.

FEL A., 1962. Les hautes Terres du Massif central. Traditions paysannes et économie agricole. *Publ. Fac. Sci. humaines*, Clermont-Ferrand, *P. U. F.*, 340 p.

GÈZE B., 1959. La notion d'âge du sol. *Ann. agron.*, **10**, 237-249.

GLANGEAUD Ph., 1921. Les monts de la Margeride ; leurs éruptions prophyriques ; leurs cycles d'érosion et leurs glaciers. *C. R. Acad. Sci.*, **172**, 226-229.

GODRON M. et coll., 1962. *Codification et transcription sur cartes mécanographiques perforées des relevés d'inventaire de la végétation*. Docum. ronéo. C. E. P. E., Montpellier.

GRIMAUD, BALMELLE, 1925. *Précis d'histoire du Gévaudan*. Ed. Champion, Paris.

GUINIER Ph., 1956. Arbres et forêts du Massif Central. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, **103**, 99-113.

HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS B. et MONNIER G., 1960. *Le profil cultural, principes de physique du sol*. Soc. Éd. Ing. agricoles, Paris, 320 p.

JULLIAN C., 1901. *Histoire de la Gaule*. Champion, Paris, 7 vol.

KUBIENA W. L., 1953. *The soils of Europe*. Th. Murby and Co, London, 384 p.

LAPADU-HARGUES P., 1947. Les massifs de la Margeride et du mont Lozère. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, **16**, 222, 379-532.

LEMÉE G., 1955. L'évolution de la forêt française au cours du Quaternaire d'après les analyses polliniques. *Rev. Forest. Fr.*, **6**, 442-460.

LEMÉE G., 1956. Sur l'évolution de la végétation dans le massif du Cantal au tardiglaciaire et au postglaciaire. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, **25**, 83-94.

MANIL G., 1953. Quelques remarques sur les sols forestiers ardennais. *Pédologie*, **3**, 10-12.

MANIL G., 1958. L'humus forestier. 2e partie. Une première application : la classification des sols forestiers, *Bull. Soc. Roy. Forest, Belgique, Sept.*, 28 p.

MANIL G., PECROT A., 1954. Les sols forestiers oligotrophes du climat des Ardennes belges. *Actes et C. R. du Ve Congr. Inter. Sci. Sol*, **4**, 441-446.

MANIL G. et *al.*, 1963. L'humus, facteur de station dans les hêtraies acidophiles de Belgique. *Bull. Inst. Agron. St. de Rech. Gembloux*, **31**, (1), 28-162 et **31** (2) 183-222.

MONTARLOT G. et FABRE S., 1951. Observations sur des roches et des sols en différents lieux des Cévennes et du Massif central. *Bull. Soc. Langu. Géogr.*, **22**, 292-338.

MUNSELL, 1954. *Soils color Charts*. Munsell Color Company, inc., Baltimore.

Ann. agron., 1965, **16** (4), 433-448.

DOSAGE DES BASES ÉCHANGEABLES A L'AIDE DU PHOTOMÈTRE A FLAMME EPPENDORF

C. DUTHION

Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, Dijon (Côte-d'Or)

SOMMAIRE

Le photomètre à flamme « Eppendorf » permet de doser les bases échangeables du sol.

Grâce à sa conception, certaines interférences sont considérablement diminuées. Calcium, potassium et sodium sont dosés dans de bonnes conditions. Pour le calcium, toujours présent en quantité relativement importante, aucun problème ne se pose. Dans le dosage du potassium, il y a lieu de tenir compte des interférences dues à Ca^{++}. Le calcium et le potassium interférent dans le dosage du sodium.

La détermination du magnésium reste délicate. L'adjonction de certaines substances organiques aux solutions, préconisée d'un point de vue plus général par de nombreux auteurs, n'y apporte pas d'amélioration.

INTRODUCTION

Les conditions d'utilisation du photomètre à flamme « Eppendorf » pour le dosage des éléments minéraux, calcium, magnésium, potassium, sodium, dans les fourrages, le lait et les excreta, ont été bien définies par GUÉGUEN et ROMBAUTS (1961). Des résultats de mesures, relatifs aux fourrages, corroborent très sensiblement leurs conclusions.

Nous avons, par ailleurs, entrepris une étude semblable à la leur dans le but de définir les possibilités de l'appareil pour la détermination des bases échangeables des sols. C'est ainsi qu'après avoir posé le problème des interférences dans ce cas particulier, nous avons tenté d'établir les conditions qui doivent permettre une bonne exactitude dans cette détermination. Enfin, nous avons testé, tout spécialement pour le dosage du magnésium, l'efficacité de quatre substances organiques (complexon III, glycérol, hydroxy-8-quinoléine, acide propionique) dont plusieurs auteurs ont montré l'action dans certains cas intéressante tant sur l'émission de l'élément à doser que sur les interférences produites par les éléments étrangers.

I. — CARACTÉRISTIQUES DU PHOTOMÈTRE A FLAMME « EPPENDORF »

Le photomètre à flamme « Eppendorf » présente des caractéristiques qu'il est intéressant de rappeler ici :

— Par le choix du gaz combustible (propane, acétylène ou hydrogène) et grâce à une admission éventuelle d'oxygène, on peut agir assez facilement sur les propriétés de la flamme. Il est ainsi possible d'obtenir, avec une stabilité satisfaisante, des températures suffisamment élevées pour exciter le calcium et le magnésium.

— La conception du dispositif de pulvérisation est telle que la quantité de solution atomisée arrivant à la flamme est très faible (elle n'en modifie donc pas la température), et pratiquement indépendante du niveau du liquide dans le récipient de prélèvement.

— La sélection des raies d'émission est obtenue par des filtres interférentiels à bandes passantes très étroites, montés en tambour autour d'un photomultiplicateur d'électrons dont la sensibilité est réglée séparément pour chaque élément sur un présélecteur à 9 étages. Ceci, joint à l'existence de trois échelles de sensibilité, permet, en principe, de travailler sur un éventail assez large de concentrations.

II. — MESURES

Si le domaine spectral du photomultiplicateur livré avec l'appareil (référence RCA IP 22) convient bien pour le dosage des alcalins et du calcium, les mesures pour le dosage du magnésium, qui se font sur le sommet de la bande 380 mμ due à l'oxyde MgO, nécessitent un récepteur plus sensible dans le proche ultraviolet (par exemple RCA IP 21).

Nous avons adopté, en ce qui concerne le potassium, le sodium et le calcium, les conditions de flamme proposées par GUÉGUEN et ROMBAUTS (1961), que nous résumons dans le tableau 1. Il nous a paru, par contre, que la quantité d'oxygène, utilisée dans le dosage du magnésium, était trop élevée : il semble bien, en effet, qu'au-delà d'un débit de 0,8 à 1,0 l/mn, le rapport émission/fond de flamme diminue notablement.

TABLEAU I

Élément	Mélange gazeux	Carburant		Comburant		
				Air comprimé		Oxygène
		pression en mn d'eau	débit l/mn	pression kg/cm²	débit l/mn	débit l/mn
K	Air-propane	160	0,5	0,5	10	—
Na	Air-propane	160	0,5	0,5	10	—
Ca	Acétylène-air	500	1	0,5	10	—
Mg	Hydrogène-air-oxygène	800	4	0,5	10	1

III. — DOMAINE D'UTILISATION

Le tableau 2 rassemble les données concernant la sensibilité de l'appareil. A côté des concentrations limites décelables données par le constructeur, y sont indiquées les concentrations dans l'intervalle desquelles les courbes d'étalonnage sont, en solutions pures, sensiblement linéaires. Celles-ci limitent donc les domaines d'utilisation optimale du photomètre.

Ils sont très semblables à ceux déjà notés par GUÉGUEN et ROMBAUTS (1961). Dans le cas du sodium, ces limites se révèlent cependant un peu plus étroites, puisque le phénomène de *self-absorption* est marqué au-delà de 40 ppm.

Les concentrations en magnésium des solutions que nous aurons à analyser sont très inférieures au domaine d'utilisation prévu pour l'appareil (concentrations supérieures à 200 ppm). Néanmoins, l'emploi d'un photomultiplicateur plus sensible au proche ultraviolet, permet des déterminations à partir de 10 ppm. Mais l'amplification du courant photoélectrique nécessitée entraîne un accroissement considérable du fond de flamme et, par contre-coup, une certaine instabilité du spot lumineux qui peut rendre malaisées des lectures en grande série.

TABLEAU 2

Élément	Sensibilité en ppm	Intervalles de concentrations optimales en ppm
K	0,002	5-100
Na	0,001	2- 40
Ca	0,02	10-100
Mg	2	(10)- > 200

Il est généralement admis qu'il est nécessaire, pour obtenir une précision voisine de ± 1 p. 100, toutes les autres conditions étant par ailleurs optimales, que le rapport (limite inférieure du domaine d'utilisation/limite de perception) soit supérieur à 100 (BURRIEL-MARTI et RAMIREZ-MUNOZ, 1957) ; ce qui est réalisé pour le potassium, le sodium et le calcium. En utilisant un raisonnement analogue, on montre que, dans le dosage de 20 ppm de magnésium, on ne peut, théoriquement, et en admettant que le changement de photomultiplicateur n'ait pas modifié la limite de sensibilité de l'appareil, obtenir une précision supérieure à ± 10 p. 100.

IV. — ÉTUDE DES INTERFÉRENCES

Nous avons repris le problème général des interférences dans les limites de concentrations usuelles des solutions à analyser.

L'action des matières organiques n'est pas envisagée. Cependant leur influence assez complexe sur les propriétés physiques des solutions et l'augmentation du fond de flamme qu'elles provoquent ont été étudiées par de nombreux auteurs et rendent le plus souvent leur destruction préalable nécessaire.

1. *Interférences dues aux anions*

D'une manière générale, les anions affectent l'émission des éléments à doser en réduisant leur ionisation. Il semble (EGGERSTEN et *al.*, 1951), que les anions, sous forme combinée ou sous forme d'acides libres, nuisent à la vaporisation

normale de l'aérosol : la phase liquide dans la fraction de cet aérosol qui atteint la flamme est alors relativement plus importante et la température de celle-ci est abaissée.

Ainsi, alors qu'il a été montré (BAKER et JOHNSON, 1954) qu'entre pH = 2 et pH = 7 les résultats sont indépendants de la concentration en ions H^+, les ions Cl^-, introduits sous forme d'acide chlorhydrique pour reprendre le résidu de la solution d'épuisement selon la méthode METSON (LEFÈVRE, 1961), exercent un effet dépressif non négligeable (graphiques de la fig. 1).

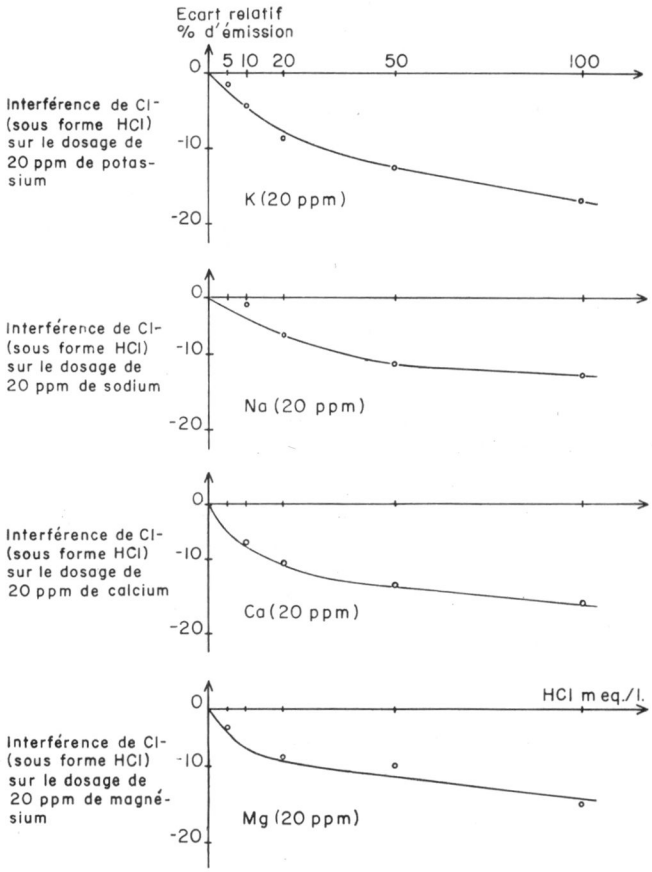


FIG. 1. — *Interférences de Cl^- (sous forme HCl) sur le dosage de K, Na, Ca et Mg*

Les difficultés, habituelles à la photométrie de flamme, de dosage du calcium et, mais à un moindre degré, des autres cations en présence des ions phosphoriques, sont ici très atténuées (tabl. 3).

Cette amélioration est attribuée aux caractéristiques du bloc brûleur-chambre de pulvérisation de l'appareil.

Les ions acétates sous forme d'acide acétique, provoquent une augmentation apparente de l'émission des quatre cations.

2. *Interférences dues aux cations*

Nous n'étudierons ici que les interactions réciproques des quatre cations à doser K^+, Na^+, Ca^{++} et Mg^{++}, et celle de l'ion NH_4^+.

En effet, les autres cations pouvant intervenir ne se trouvent pas ou existent seulement à l'état de traces dans les solutions à analyser. C'est le cas, tout particulièrement des ions aluminium qui ne sont pas extraits par l'acétate d'ammonium N tamponné à pH = 7 (E. LEFEBVRE-DROUET et S. MÉRIAUX, 1963) et des ions ferriques dont la précipitation à l'état d'hydroxyde est complète dès pH = 3,2.

TABLEAU 3

Interférence due aux ions PO_4^{3-} dans le dosage de Ca

Concentration P en ppm (sous forme H_3PO_4)	Concentration Ca apparente en ppm	
0	20	40
25	19,8	39,2
50	19,7	38,8
100	19,4	—
150	19,5	38,5

L'emploi de filtres à bandes passantes très étroites permet d'éliminer la majorité des interférences directes en même temps qu'il limite considérablement celles qui sont provoquées par le fond de flamme. La présence de cations étrangers doit donc se traduire essentiellement par des interférences indirectes, entraînant une modification des conditions d'excitation du cation à doser dans la flamme. C'est ainsi que l'augmentation de la concentration ionique des solutions, en gênant cette excitation, provoquera, dans la plupart des cas, un abaissement du niveau de l'émission.

1. *Interférences sur le potassium.*

A des concentrations cinq fois supérieures, d'ailleurs tout à fait improbables à moins de cas très particuliers, le sodium ne provoque aucune variation de l'émission due à K (tabl. 4).

TABLEAU 4

Interférence due au sodium sur le potassium

Na en ppm	K apparent en ppm
0	20
10	20
20	20
80	19,8
100	20

L'action du calcium est, par contre, très marquée. Elle provoque une nette diminution du potassium déterminé (tabl. 5). Pour un rapport K/Ca = 1/25, l'écart relatif (K apparent — K réel)/K réel est voisin de — 10 p. 100, indépendamment de l'anion lié.

TABLEAU 5

Interférence due au calcium dans le dosage du potassium et du sodium

Ca ppm	K apparent ppm		Na apparent ppm
0	20	40	20
20	20	—	20,2
40	19,8	39,5	19,7
80	19,5	39,25	19,6
100	—	38,5	—
200	18,8	38,4	19,3
500	18,3	37,1	18,5
1 000	17,5	36	18,3
2 000	15,75	32	19
5 000	13,65	30,5	18,5

Le magnésium exerce également une action dépressive (tabl. 6), qui, aux concentrations habituelles, est cependant négligeable.

Les sels d'ammonium agissent, d'une manière générale, dans le même sens. En solution normale en acétate d'ammonium, l'émission du potassium est abaissée de 25 p. 100.

TABLEAU 6

Interférence due au magnésium sur le potassium

Mg en ppm	K apparent en ppm
0	20
10	20,2
20	19,9
40	19,5
100	19

2. *Interférences sur le sodium.*

La présence de potassium augmente de manière sensible, la concentration apparente en sodium (tabl. 7).

On atteint ici rapidement un palier qui se poursuit au-delà de la concentration 100 ppm en K, ainsi que l'ont déjà noté GUÉGUEN et ROMBAUTS (1961). En conséquence, il sera suffisant, dans la plupart des cas, de choisir arbitrairement, lors de la préparation des solutions-étalons, une concentration moyenne en potassium.

Le calcium exerce, quoique de façon moins prononcée que pour le potassium, une interférence négative. Pour un rapport Na/Ca = 1/25, l'écart relatif (Na apparent — Na réel)/Na réel est d'environ — 7,5 p. 100 (tabl. 5).

TABLEAU 7

Interférence due au potassium sur le sodium

K en ppm	Na apparent en ppm	
0	10	20
10	10,6	20,9
20	10,85	21,2
40	11	21,35
80	11,1	21,3
100	11,1	21,4

Le magnésium, aux concentrations habituelles, n'interfère pas. L'ammonium, sous forme d'acétate agit dans les mêmes proportions que pour le potassium.

3. *Interférences sur le calcium.*

Le calcium est de loin l'élément le plus abondant dans les solutions d'extraction. C'est pourquoi les autres cations échangeables interviennent peu dans son dosage.

En milieu acétate d'ammonium normal, l'émission du calcium est abaissée d'environ 25 p. 100 comme pour K et Na.

4. *Interférences sur le magnésium.*

La présence des alcalins dans la solution entraîne une augmentation considérable de la concentration apparente en magnésium (fig. 2), plus marquée sous l'effet du sodium que du potassium : l'erreur par excès est de + 30 p. 100 pour un rapport K/Mg = 5 et de + 50 p. 100 lorsque Na/Mg = 5. Le parallélisme des droites tra-

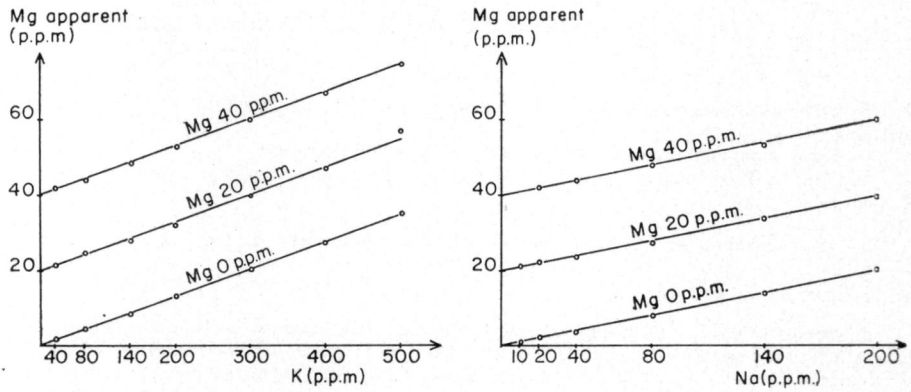


FIG. 2. — *Interférences de K et Na sur le dosage de Mg*

duisant l'action des quantités croissantes de K ou Na sur une quantité déterminée de magnésium, entre elles et avec les « courbes d'étalonnage » de K ou Na seuls, à la longueur d'onde de ces mesures, incline à penser qu'il pourrait s'agir d'interférences directes.

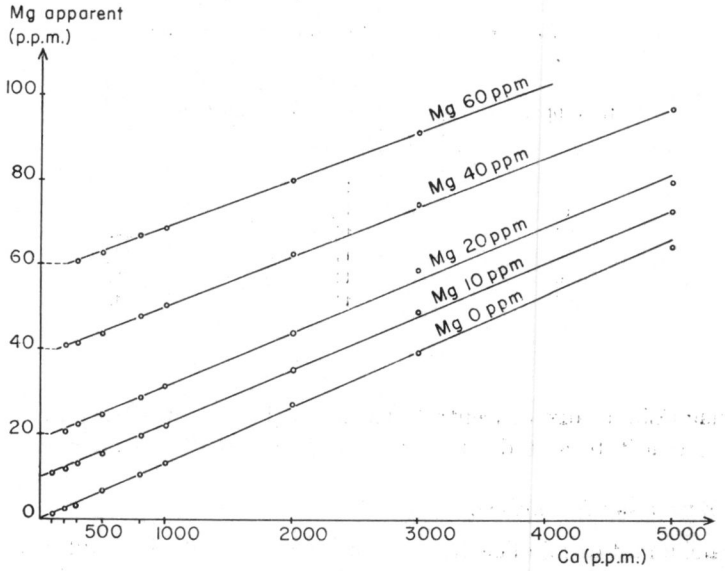


FIG. 3. — *Interférences de Ca sur le dosage de Mg*

Le calcium intervient également sur l'amplitude de l'émission apparente due au magnésium, mais de façon moins prononcée que les alcalins (fig. 3). La nature de cette interférence ne paraît pas aussi certaine que pour ces derniers.

L'ammonium, sous forme d'acétate, exerce comme pour les cations précédents une action dépressive.

V. — DOSAGES DES BASES ÉCHANGEABLES

Nous avons utilisé, pour le dosage des bases échangeables. deux techniques dérivées de la même méthode :

— l'une, avec traitements préalables du percolat d'extraction ;
— l'autre, directe sur ce percolat, c'est-à-dire en milieu acétate d'ammonium normal.

1. *Détermination des bases échangeables après traitements du percolat d'extraction*

1. *Préparation des échantillons.*

La percolation de 10 g de sol par 200 ml d'acétate d'ammonium N est faite selon la technique dérivant de celle de METSON, décrite par LEFÈVRE (1961), pour la détermination de la capacité d'échange. Le résidu du percolat d'extraction après évaporations et traitements à l'eau régale au cours desquels sont éliminés les ions acétates et ammonium. et la matière organique est détruite, est repris par HCl. Le volume final de la solution sur laquelle se fera les lectures est de 50 ml.

2. *Dosages des bases échangeables.*

Compte tenu des phénomènes d'interférences déterminés plus haut et des concentrations relatives des différents cations, il paraît nécessaire de faire les dosages dans l'ordre suivant : calcium, potassium, sodium, magnésium.

Nous donnons ci-dessous les conditions relatives à chaque dosage.

Dosage du calcium échangeable.

Aucun problème d'interférence ne se pose dans le dosage du calcium qui est toujours, et de loin, l'élément le plus abondant. On utilise une gamme de solutions-étalons de 10 à 100 ppm et l'on dilue de manière convenable la solution à doser.

Dosage du potassium échangeable.

On utilisera une gamme de 10 à 60 ppm correspondant à la plupart des cas (0,12 à 0,75 méq/100 g de sol) à laquelle on ajoutera la quantité, déterminée précédemment, de calcium. Il est possible de préparer à l'avance un certain nombre de gammes auxquelles on ajoutera des quantités définies de calcium : par exemple 200 (correspondant à 5 méq/100 g) 300 — 400 — 500 — 600 — 800 — 1 000 ppm (correspondant à 25 méq/100 g).

Dosage du sodium échangeable.

On utilisera une gamme de 5 à 20 ppm (0,10 à 0,43 méq/100 g) englobant la majorité des cas. Il est nécessaire de compenser les interférences dues au calcium et au potassium. On peut donc, comme pour le dosage précédent, préparer une série de gammes étalons contenant 200 — 300 — 400 — 500 — 600 — 800 — 1 000 ppm de calcium. On ajoutera à ces gammes, par suite du palier d'interférence, une quantité uniforme de potassium ; nous choisirons 40 ppm de K (valeur correspondant à 0,50 méq K/100 g). Remarquons qu'en procédant ainsi, et si la concentration en potassium est en réalité de 20 ppm, nous n'entraînons, *a priori*, qu'une erreur relative maximale d'environ 1 p. 100.

Dosage du magnésium échangeable.

S'il est possible de déterminer jusqu'à 10 ppm de magnésium avec une approximation relativement bonne, il n'en reste pas moins que des précautions sont à prendre.

L'emploi de détendeurs donnant des débits gazeux aussi parfaitement stables que possible est nécessaire. En particulier pour l'oxygène, on ne peut se contenter des débitmètres habituels (types médicaux par exemple). Par ailleurs, on devra, semble-t-il, toujours choisir, sur le présélecteur, l'amplification minimale restant compatible avec les concentrations à mesurer, puisqu'en effet, chaque fois que l'on monte un palier dans l'amplification, on accroît par là même le fond de flamme.

L'importance des interférences signalées plus haut impose une connaissance exacte de la composition des solutions à analyser. Dans la majorité des cas que nous avons à prévoir, seules les actions du calcium et du potassium sont à craindre. On pourra en tenir compte en préparant des gammes étalons dont les teneurs en ces deux cations soient très voisines de celles de nos solutions. Mais ce procédé a pour inconvénient majeur de multiplier leur nombre. Il paraît plus avantageux, mais sans doute aussi au détriment de la précision, d'utiliser des abaques faisant intervenir à la fois les concentrations en calcium et potassium. Nous avons vérifié, à cet effet, que les interférences produites par l'un de ces deux cations ne sont pas modifiées par la présence de l'autre.

3. *Validité des résultats obtenus.*

Afin d'évaluer la validité des résultats obtenus nous avons procédé à des comparaisons avec d'autres méthodes de dosage et à des essais de surcharge.

Le tableau 8 rassemble quelques résultats relatifs au dosage du calcium en comparaison avec la méthode à l'oxalate.

Pour le potassium et le sodium, les données sont très voisines de celles obtenues avec un autre photomètre à flamme (Électrosynthèse).

Pour le magnésium, nous avons pris comme comparaisons les résultats fournis dans la détermination par le phosphate ammoniaco-magnésien (tabl. 9). Cette dernière méthode n'est malheureusement pas exempte d'imprécision, ce qui peut expliquer une partie des écarts observés, qui sont parfois très importants.

Dans le tableau 10, nous rassemblons quelques-uns des essais de surcharge relatifs au calcium et au magnésium. Des essais analogues avec K et Na nous ont permis de retrouver les quantités ajoutées à nos solutions à $\pm$ 1 p. 100 près.

En définitive, on peut donc considérer qu'il est relativement facile de s'assurer, dans la détermination de K, Na ou Ca une précision proche de ± 3 p. 100.

En ce qui concerne le magnésium, nous avons déjà dit que l'on ne pouvait espérer, aux concentrations habituelles (20 à 40 ppm) de précision supérieure à ± 10 p. 100, ce que les essais de surcharge semblent bien confirmer. Notons qu'il n'y a pas discordance entre ces derniers et ceux cités par

TABLEAU 8

Comparaison Ca Eppendorf — Ca méthode oxalate

Sols référence	Ca me/100 g methode oxalate	Ca me/100 g Eppendorf
KO 242	0,89	0,76
KO 232	0,64	0,49
KJ II	19,18	18,31
KJ IV	18,00	17,35
KJ V	16,60	16,70
KK I	40,05	40,60
KK IV	39,30	39,05
KK V	33,80	32,70
KL I	23,60	24,00
KL II	27,00	27,30
KL III	24,45	24,85
KL IV	24,82	25,00
KG III	56,65	57,25
KG VIII	54,35	54,25

TABLEAU 9

Comparaison Mg phosphate ammoniaco-magnésien - Mg Eppendorf

Sols références	Mg méq/100 g phosphate ammoniaco-magnésien	Mg méq/100 g Eppendorf
JS 21	0,81	0,65
JS 51	0,67	0,75
JS 91	0,88	0,83
JS 92	0,81	0,76
La Molière 21	0,61	0,82
La Molière 53	0,52	0,65
JT III-I	0,33	0,36
JT IV-I	0,34	0,38
MJ III-21	0,75	1,07
III-31	0,79	0,85
MJ IV-11	0,55	0,87
IV-21	0,55	0,69
MJ I-12	0,68	0,79
I-22	0,61	0,78

GUÉGUEN et ROMBAUTS (1961) puisque, dans ce cas, nous avons travaillé à des concentrations nettement plus faibles qu'eux. Ces différents résultats montrent bien, par contre, que nous nous trouvons nettement en dehors du domaine normal de l'appareil.

TABLEAU 10

Essais de surcharge

Ca ajouté (en γ)	Ca total (en γ)	% retrouvés du Ca ajouté
250	702	98,8
250	750	96,8
250	712	98,9
1 000	2 800	100,8
2 000	3 800	100
2 000	3 916	102,3

Mg ajouté (en γ)	Mg total (en γ)	% retrouvés du Mg ajouté
100	143	104,7
100	146	98,8
100	180	95,4
100	193	104,8
100	200	108
100	200	119
100	202	109
100	211,5	111,9
100	222	109,5

2. *Détermination directe des bases échangeables sur le percolat*

Dans ce paragraphe, nous n'avons pas envisagé le dosage du magnésium. La diminution de l'émission constatée en milieu acétate d'ammonium normal rend évidemment ses conditions de mesure encore plus aléatoires.

1. *Domaines d'utilisation.*

Les limites de concentrations qui constituent le domaine réel d'utilisation de l'appareil ne sont pas modifiées. Ce qui implique, malgré tout, que dans le dosage du potassium et du sodium, nous nous trouverons quelque peu limités par la dilution qui résulte de cette technique (teneurs inférieures à 0,10 ou 0,15 méq/100 g de sol environ).

2. *Dosages des bases échangeables.*

Les déterminations sont faites directement sur le percolat d'extraction amené à 200 ml. Les gammes-étalons sont préparées en milieu acétate d'ammonium normal. Par suite de la concentration ionique élevée du milieu, on note une inertie dans la réponse du photomètre et une certaine lenteur dans la stabilisation du spot lumineux.

Le tableau 11 rassemble, pour quelques sols de caractères très différents, les résultats obtenus comparativement, avec ou sans élimination de l'acétate d'ammonium.

La correspondance est bonne pour le calcium et le potassium. D'une manière générale, les chiffres paraissent un peu plus élevés après lectures directes sur le percolat, mais il faut, néanmoins, noter que les écarts observés sont du même ordre de grandeur que la dispersion des mesures due à l'échantillonnage.

Par contre, pour le sodium, les différences sont accusées. On doit les attribuer à une dilution excessive qui conduit à des concentrations très inférieures au domaine utilisable.

Les essais de surcharge donnent, pour Ca^{++} et K^{+}, des résultats comparables à ceux obtenus précédemment. Ils sont beaucoup plus variables dans le cas du sodium.

TABLEAU II

Sols références	Bases échangeables après traitement du percolat			Bases échangeables — Lectures directes sur le percolat		
	Ca (méq/100 g)	K (méq/100 g)	Na (méq/100 g)	Ca (méq/100 g)	K (méq/100 g)	Na (méq/100 g)
JS 11	46,5	0,37	0,16	48	0,44	0,09
JS 51	64	0,44	0,20	61	0,48	0,12
JS 91	70	0,50	0,23	70,7	0,57	0,15
La Molière 21	3,25	0,19	0,13	3,65	0,22	0,05
La Molière 41	2,20	0,25	0,13	2,45	0,28	0,05
La Molière 53	0,80	0,11	0,11	0,85	0,11	0,03
JT III 1	5,80	0,25	0,11	6,45	0,27	0,04
JT IV 1	6,05	0,22	0,11	5,80	0,21	0,05

VI. EFFETS DE QUELQUES SUBSTANCES ORGANIQUES SUR L'INTENSITÉ DE L'ÉMISSION DE Mg, Ca, K, Na ET SUR LEURS INTERFÉRENCES RÉCIPROQUES

De nombreux articles, dans la littérature récente, préconisent l'adjonction aux solutions à titrer de diverses substances qui auraient pour effet d'exalter l'intensité de l'émission de l'élément à doser ou d'inhiber les interférences dues aux éléments étrangers. Dans l'espoir d'appliquer cette technique à notre cas particulier, nous avons étudié l'action de quatre d'entre elles sur le dosage du magnésium et, éventuellement, du calcium, du potassium et du sodium. Les résultats en sont brièvement rapportés ci-dessous.

1° *Hydroxy-8-quinoléine*

J. DEBRAS-GUÉDON et I. VOINOVITCH (1958-1961), puis DELAS (1964) ont mis en évidence l'action intéressante de l'hydroxy-8-quinoléine dans le dosage, par spectrophotométrie de flamme, de nombreux éléments.

Mais il apparaît que ces données ne sont que très peu transposables aux possibilités du photomètre à flamme Eppendorf. Sur des solutions préparées ainsi que le proposent ces auteurs, nous n'avons noté aucune atténuation des effets d'interférence du calcium, du potassium, et du sodium sur le magnésium. Si l'émission due à ce dernier est apparemment plus forte, l'augmentation est du même ordre que celle observée après la seule adjonction d'acide acétique (utilisé pour préparer la solution d'hydroxy-8-quinoléine).

Il faut, sans aucun doute, attribuer ce manque d'efficacité, que l'on retrouve aussi bien dans le dosage du calcium, du potassium ou du sodium, aux caractéristiques de l'appareil (conditions de flamme, système optique, longueurs d'ondes auxquelles se font les mesures etc.) sur lesquelles l'opérateur ne peut pas ou fort peu agir, et qui sont très différentes de celles des appareils utilisés par les auteurs précités.

2° *Acides aliphatiques*

A. C. WEST (1964) a montré l'exaltation de l'émission du calcium produite par les acides aliphatiques (acide formique à acide caproïque) et leurs sels, d'autant plus marquée que la condensation en carbone de l'acide est plus élevée.

Nous avions pu déjà noter que la présence d'acide acétique avait une action positive sur l'intensité de l'émission due à l'un des quatre cations (calcium, magnésium, potassium et sodium), mais sans, pour autant, diminuer leurs interférences réciproques.

L'acide propionique, jusqu'à une concentration de 0,1 M, entraîne également une augmentation modérée du niveau de l'émission du magnésium ou du calcium, mais se révèle tout autant inefficace quant aux interférences.

3° *Acide éthylène diamine tétracétique*

L'acide éthylène diamine tétracétique, sous forme de son sel disodique (complexon III) a été utilisé par A. C. WEST et W. D. COOKE (1960) pour éliminer les interférences dues aux anions dans le dosage du calcium et du magnésium. Leur étude montrait notamment que, pour Mg, l'effet de l'EDTA était plus intéressant pour les mesures faites sur la raie 285 mμ plutôt que sur le sommet de la bande 380 mμ.

Il ressort de nos essais, en ce qui concerne le magnésium, qu'une exaltation optimale de l'émission se produit pour une concentration 0,1 M en EDTA. Mais son ampleur n'a rien de commun avec celle, qu'on aurait dû attendre de l'introduction sous une autre forme de quantités de sodium équivalentes à celles apportées par cette technique. Il s'agit donc bien d'une action spécifique de l'EDTA. Par ailleurs, celui-ci atténue mais n'élimine pas les interférences dues à des teneurs moyennes en calcium et potassium. Cette atténuation est plus marquée à pH = 4 qu'à pH = 8 ou 10, pour l'interférence due au calcium.

La même exaltation de l'émission apparaît pour le calcium, avec un optimum à une concentration 0,1 M en EDTA.

4° *Glycérol*

Le glycérol (J. d'ANZAC et J. C. DANYARD, 1964) supprime l'action inhibitrice des phosphates sur le calcium.

Utilisé à la concentration de 0,5-1-2 p. 100, il n'a, par contre, aucun effet sur l'émissivité du magnésium ou sur les interférences qu'il subit. Il apparaît également sans action sur le niveau de l'émission des trois autres cations ou leurs interférences mutuelles.

On voit donc que, dans les conditions de travail du photomètre à flamme Eppendorf, aucune des quatre substances étudiées n'offre de propriétés intéressantes. Ainsi, même pour l'EDTA qui s'est montré relativement le plus efficace, leur emploi n'est aucunement justifiable.

VII. — CONCLUSION

Le photomètre à flamme Eppendorf présente des caractéristiques qui doivent pemettre de l'utiliser pour le dosage des cations échangeables des sols.

Les concentrations relatives de ces derniers et leurs interférences réciproques imposent, pour leur détermination, l'ordre suivant : calcium, potassium, sodium, magnésium.

Le dosage des trois premiers se fait avec une grande sensibilité et conduit facilement à une précision de ± 3 p. 100 ou supérieure.

Le dosage du magnésium reste délicat. Il est évident que l'appareil n'a pas été conçu pour des concentrations aussi faibles que celles que nous rencontrons. Cependant, il est possible de déterminer de 10 à 20 ppm de Mg si l'on peut se contenter d'une précision comprise entre ± 10 p. 100 et ± 15 p. 100. Pour cela, néanmoins, il est nécessaire de tenir compte étroitement des interférences dues aux alcalins et au calcium, soit en préparant des gammes-étalons de composition aussi proche que possible de celles des solutions à analyser, mais ce qui multiplie considérablement leur nombre, soit en utilisant des abaques.

L'emploi de certaines substances organiques, pourtant préconisé par plusieurs auteurs, soit pour accroître l'émissivité de l'élément à doser, soit pour atténuer les interférences dues aux autres éléments présents, s'est révélé dans notre cas, et tout particulièrement, dans le dosage du magnésium, totalement inefficace.

Reçu pour publication en octobre 1965.

SUMMARY

DOSAGE OF EXCHANGEABLE BASES BY MEANS OF THE EPPENDORF FLAME PHOTOMETER

The Eppendorf flame photometer offers interesting characteristics which allow its use for the dosing of exchangeable bases.

As a result of its build, certain interferences are suppressed or considerably reduced. Calcium, which is always present in relatively high amounts, is easily dosed. But it interferes in the dosage of Potassium and Sodium ; the relative decrease of the emission is thus of about 10 p. 100 for a K/Ca ratio : 1/25 and of 75 p. 100 for Na/Ca : 1/25. The action of Potassium on Sodium shows itself almost immediately by a level of interference. The measurements of these three cations may be carried out at ± 3 p. 100.

The dosage of Mg is far more difficult and supposes a previous exact knowledge of the Ca, K and Na concentrations. Indeed, the latters and especially the alkalines, considerably affect the Mg emission : positive error of + 35 p. 100 for K/Mg = 5 and of + 50 p. 100 for Na/Mg = 5. It is possible to dose 20 ppm of Mg, with an accuracy included between ± 10 and ± 15 p. 100. None of the organic matters studied (complexon III, glycerol, hydroxy-8-quinolein, propionic acid) allow to improve the conditions of this last dosage.

ZUSAMMENFASSUNG

BESTIMMUNG DER AUSTAUSCHBAREN BASEN
MIT DEM EPPENDORFSCHEN FLAMMENFOTOMETER

Das Eppendorfsche Flammenfotometer hat interessante Eigenschaften, die die Bestimmung der austauschbaren Basen gestatten.

Durch seinen Bau sind gewisse Interferenzen ausgeschaltet oder gewaltig verringert.

Das Kalzium, immer in verhältnismässig grossen Mengen vorhanden, wird ohne besondere Schwierigkeit bestimmt. Es interferiert jedoch in den Bestimmungen des Kaliums und des Natriums. Die relative Abnahme der Emission beträgt ugf 10 p. 100 für ein Verhältnis K/Cal = 1/25 und 7,5 p. 100 für ein Verhältnis Na/Ca = 1/25. Die Wirkung des Kaliums auf Natrium kennzeichnet sich sofort durch eine Interferenzstufe. Die Messungen dieser drei Kationen können mit ± 3 p. 100 erfolgen.

Die Bestimmung des Magnesiums ist viel schwieriger und setzt genaue Kenntnis der Ca-, K- und Na-Konzentration voraus. Letztere, insbesondere die alkalischen, beeinflussen in hohem Masse die Emission des Mg : ein Plusfehler von + 35 p. 100 für K/Mg = 5 und von + 50 p. 100 für Na/Mg = 5. Es ist möglich, 20 ppm Mg mit einer Genauigkeit zwischen ± 10 und ± 15 p. 100 zu bestimmen. Keine der untersuchten organischen Substanzen (Komplexon III, Glyzerol, Hydroxy-8-Chinolein, Propionsäure) erlaubt es, die Bedingungen dieser letzteren Bestimmung zu verbessern.

Дозаж обменных оснований при помощи пламенного фотометра Эппендорфа.

К. ДЮТИОН.

РЕЗЮМЕ

Пламенный фотометр Эппендорфа представляет характерные особенности дающие возможность применить его при дозажах обменных оснований. По одному только замыслу этого аппарата, часть интерференций совершенно устранена, или сильно ослаблена.

Кальций — всегда присутствующий в относительно крупных количествах — дозируется легко. Но он интерферирует при определениях калия и натрия; относительное уменьшение выделения при соотношении K/Ca = 1/25 представляет таким образом 10 % и 7 % — при соотношении Na/Ca = 1/25. Действие калия на натрий очень быстро выражается ступенью интерференций. Измерения этих трех катионов могут быть проведены с точностью до ± 3 %.

Дозаж магния более труден и для него необходимо предварительно учесть концентрации Ca, K и Na. Ибо эти последние и, в частности, щелочные, сильно затрудняют выделение магния : ошибка по избытку — + 35 % для K/Mg = 5 и + 50 % для Na/Mg = 5. Возможна дозировка 20 ‰ Mg с точностью от ± 10 до ± 15 %. Ни одно из испробованных органических веществ (комплексон III, глицерол, гидрокси-8-хинолеин, пропионовая кислота) не позволило улучшить условия этого дозажа.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANZAC J. d', DANYARD J. C., 1964. Le dosage du calcium dans les feuilles d'*Hévéa brasilensis*. Comparaison de méthodes spectrophotométriques et complexométriques. *Chimie analytique*, **46**, 345-353.

BAKER G. L., JOHNSON H. L., 1954. *In* BURRIEL-MARTI et RAMINEZ-MUNOZ 1957. *Flame Photometry*, 190; Elsevier publishing Company, Amsterdam.

BURRIEL-MARTI F., RAMINEZ-MUNOZ J., 1957. *Flame photometry*, 531. Elsevier publishing Company, Amsterdam.

DEBRAS-GUÉDON J., VOINOVITCH I., 1961. Analyse des minerais de fer par spectrophotométrie de flamme. *Chimie analytique*, **43** (6), 267-275.

DELAS J., 1964. Spectrophotométrie de flamme en milieu oxine. Application aux dosages du calcium et du magnésium dans les sols et les végétaux. *Ann. agron.*, **15**, 633-649.

EGGERSTEN F. T., et *al.*, 1951. in BURRIEL-MARTI et RAMINEZ-MUNOZ 1957. *Flame Photometry*, 190. Elsevier publishing Company, Amsterdam.

GUÉGUEN L., ROMBAUTS P., 1961. Dosage du sodium, du potassium, du calcium et du magnésium par spectrophotométrie de flamme dans les aliments, le lait et les excreta. *Ann. Biol. anim. Biochim. Biophys.*, **1**, 80-97.

LEFÈBVRE-DROUET E., MÉRIAUX S., 1963. Bilan des cations échangeables en sols lessivés. *Ann. agron.*, **14**, 239-260.

LEFÈVRE P., 1961. Contribution à l'étude de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols non calcaires. *Ann. agron.*, **12**, 169-206.

METSON A. J., 1956. *Methodes of chemical analysis for soil survey samples*, 208, New Zeland. Departement of Scientific and industrial research, Wellington.

STACE H. C. T., 1958. *Flame excitation methodes of spectrochemical analysis*, 119. Division of Soils, Commonwealth scientific and industrial research organisation, Australia, Melbourne.

WEST A. C., 1964. Effects of aliphatic acids and their salts on the flame spectrometric emission of calcium. *Anal. Chem.*, **36**, 310-314.

WEST A. C., COOKE W. D., 1960. Elimination of anion interferences in flame spectroscopy. Use of (ethylene dinitrilo) tetracetic acid. *Anal. Chem.*, **22**, 1471-1474.

Ann. agron., 1965, **16** (4), 449-463.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA MATURATION SUR PIED DE DEUX VARIÉTÉS DE POIS DE CONSERVE

G. LEFÈVRE, G. HIROUX (1)

Station d'Agronomie, Amiens (Somme)

SOMMAIRE

Étude destinée à suivre, au cours de la maturation, les variations de données simples (répartition de la matière verte, teneurs en eau, en insoluble alcool, azote) pouvant éventuellement soit caractériser une époque favorable de récolte, soit se rattacher à une notion de qualité restant à définir.

Lors d'une expérimentation antérieure sur pois de conserve (G. LEFÈVRE et G. HIROUX, 1961), nous avions pu prendre conscience des difficultés soulevées par la mesure de la récolte et l'interprétation de sa valeur.

Cette valeur est liée, en effet, à une certaine notion de qualité dépendant actuellement d'une séparation par calibrage.

La répartition entre ces divers calibres pouvant facilement évoluer d'un jour à l'autre, toute expérimentation devrait pouvoir s'appuyer sur une étude préalable essayant de mesurer l'amplitude des variations probables.

De plus, le calibrage, en l'absence d'autres critères, peut être insuffisant pour définir, entre variétés, une qualité se traduisant, en définitive, par un goût, dont les exigences peuvent être contradictoires suivant les individus.

Enfin, des progrès ne peuvent être réalisés que dans la mesure où l'on sait ce qu'il faut produire.

C'est en fonction de ces considérations que, en liaison avec un groupement de producteurs de l'Oise, (1), nous avons cherché à mesurer la variation, au cours de la maturation de la graine, de données simples, éventuellement utilisables dans la pratique, en utilisant deux variétés, afin d'éviter des conclusions qui ne seraient applicables qu'au cas observé.

(1) Nous remercions particulièrement M. Meyer du C. E. T. A. de Crèvecœur (Oise) de l'aide qu'il nous a apportée dans la réalisation de cet essai.

MÉTHODE EMPLOYÉE

Deux parcelles de pois, situées dans le même champ et portant l'une la varitéé *Alaska* et l'autre la variété *Chemin Long hâtif* ont été retenues. 50 pieds de chacune de ces variétés ont été récoltés chaque jour pendant 8 jours (du 22 au 30 juin) pour la première et 6 jours (du 23 au 29 juin) pour la seconde. L'ensemble de la récolte a été pesé puis séparé en fanes, cosses et graines ; chacune de ces parties a été séchée séparément.

Les graines ont été calibrées et pesées, une partie aliquote, fraîche, de chaque catégorie a été immédiatement extraite à l'alcool à 80° bouillant, pour mesurer l'insoluble, suivant la technique utilisée par HUET et LEDERGERBER (1963) et obtenir ainsi un chiffre rendant compte en grande partie de la teneur en amidon.

Les calibres comportent les divisions suivantes :

Extra-fins : inférieurs à 7,4.
Très fins : compris entre 7,4 et 8,4.
Fins : compris entre 8,4 et 9,1 (pour les 5 premiers échantillons d'*Alaska* et les 4 premiers de *Chemin Long*)
ou supérieurs à 8,4 (pour les derniers de chaque série).

Pour chacun des caractères étudiés, nous essaierons de comparer les variétés entre elles, en ramenant, sur les graphiques, les mesures, à des pourcentages du végétal ou de ses parties.

OBSERVATIONS SUR LE VÉGÉTAL ENTIER

A. *Répartition de la matière verte entre les différentes parties de la plante*

Pour éliminer les variations observées dans la production totale, par suite des difficultés d'échantillonnage, nous avons reporté sur le graphique 1 l'évolution du pourcentage de la matière verte totale occupé par chaque partie (fanes, gousses, graines).

Les variations extrêmes relevées dans ces pourcentages, au cours de la période d'observation, ont été les suivantes :

	Fanes	*Gousses*	*Graines*
Alaska	49 à 43	36,5 à 34,7	16,5 à 23
Chemin long....	52,5 à 57,4	29,5 à 24,3	15 à 18

Cette comparaison indique, comme le graphique 1, que :

1° La répartition est différente entre les deux variétés. La part prise par les fanes dans *Cheming long* est nettement plus importante que dans *Alaska*. Inversement le pourcentage des gousses est significativement plus faible.

2° Dans les deux cas, la proportion de graines augmente avec le temps, mais plutôt aux dépens des fanes chez *Alaska* et des gousses chez *Chemin long*.

On relève, en effet, peu de variations autour de 35 p. 100 du poids total pour les gousses d'*Alaska* et autour de 55 p. 100 pour les fanes de *Chemin long*.

B. *Variations de la teneur en matière sèche pour cent vert*

Le graphique 2 montre, que, à l'opposé des oscillations relevées dans la teneur en matière sèche des fanes et des gousses, le vieillissement se traduit par une augmentation, régulière, de celle des graines.

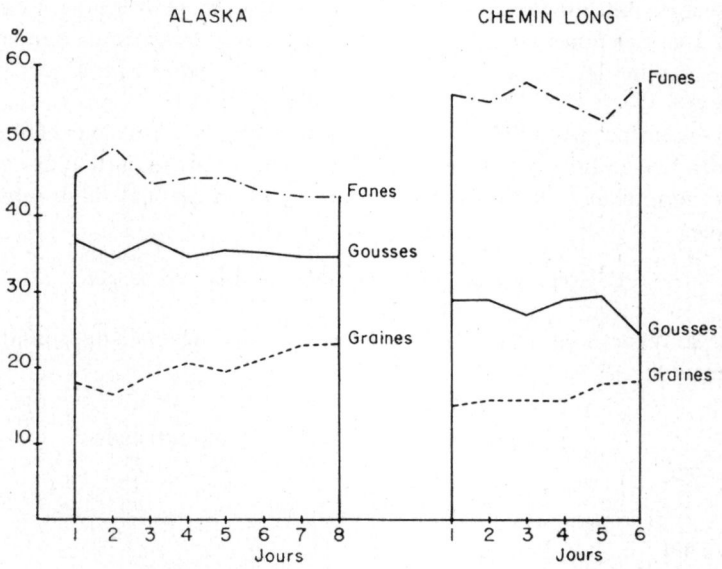


FIG. 1. — *Répartition de la matière verte en p. 100 du poids total vert*

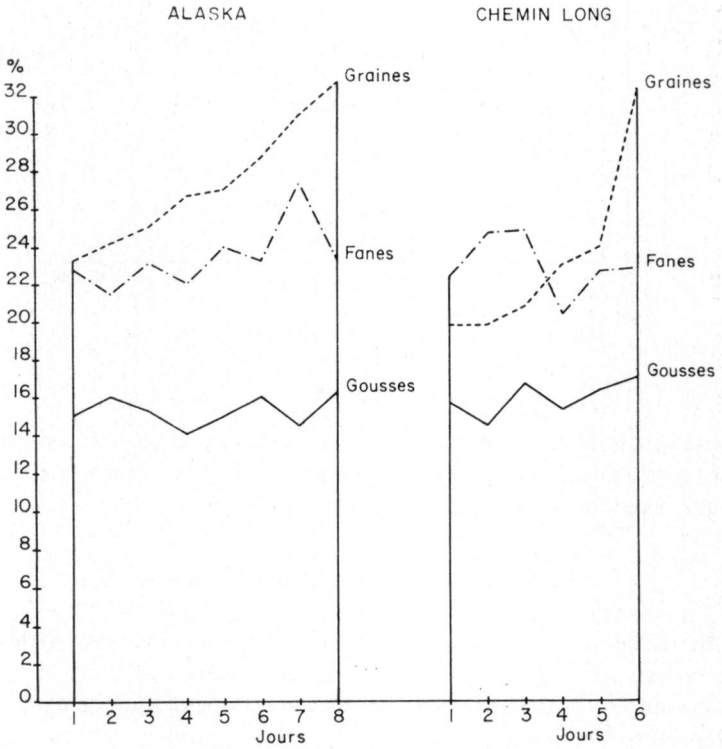


FIG. 2. — *Matière sèche p. 100 de matière verte*

Les gousses ont une teneur en matière sèche variant pour les deux variétés entre 14 et 17 p. 100. Les fanes oscillent entre 22 et 25 p. 100. Pendant ce temps, la richesse des graines évolue de 23.2 à 32,6 p. 100 pour *Alaska* et de 19,8 à 32,3 p. 100 pour *Chemin long*.

Cette évolution, pour l'ensemble des graines, quel que soit leur calibre, pourrait déjà donner une indication de leur état de maturation, mais il faut souligner que *Alaska* est nettement plus riche au départ et que l'on ne peut donc retenir une valeur absolue.

C. *Répartition de l'eau contenue dans le végétal*

L'eau se répartit (graph. 3) suivant des courbes presque superposables à celles du graphique 1.

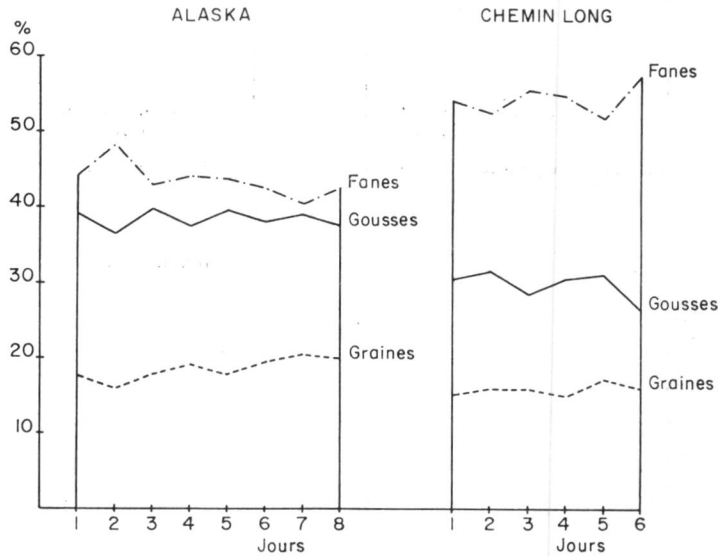


FIG. 3. — *Répartition de l'eau dans les différentes parties en p. 100 de l'eau totale contenue dans le végétal*

La part des gousses, les plus pauvres en matière sèche, est cependant un peu supérieure. Les graines, en particulier chez *Chemin long*, conservent un pourcentage presque constant (de 15 à 17,5) de l'eau totale du végétal.

D. *Répartition de la matière sèche*

La répartition de la matière sèche totale, entre les diverses parties du végétal (graph. 4), est très différente de celle de la matière verte.

L'évolution est également très sensible et l'on peut voir la part prise par les graines dépasser celle des gousses.

Le pourcentage de la matière sèche occupée par les graines passe de 20 à 32,5

p. 100 chez *Alaska* et de 15 à 25 p. 100 chez *Chemin long* soit une variation considérable faite aux dépens à la fois des fanes et des gousses.

Notons encore la différence des chiffres pour les deux variétés et en particulier l'importance prise par les fanes chez *Chemin long*.

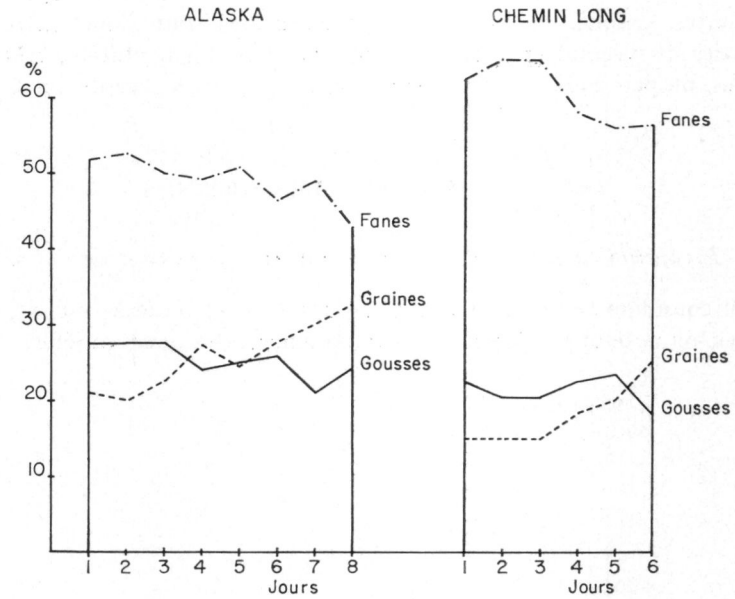


FIG. 4. — *Répartition de la matière sèche en p. 100 du poids total sec*

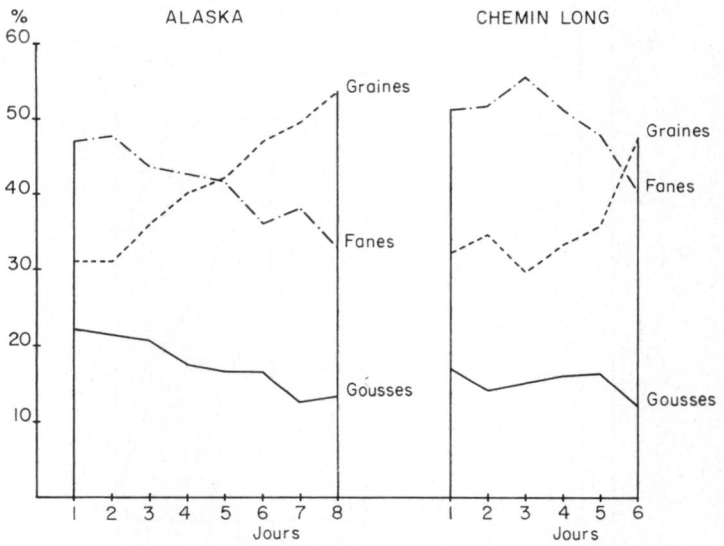


FIG. 5. — *Répartition de l'azote dans les différentes parties en p. 100 de l'azote contenu dans le végétal entier*

E. *Azote*

La teneur du végétal entier, exprimée soit en sec soit en vert, subit de faibles variations au cours de la maturation et l'on ne peut relever une évolution systématique.

Par contre, lorsque l'on calcule la répartition de l'azote global entre les différentes parties du végétal (graph. 5), on observe une augmentation, très régulière chez *Alaska*, un peu moins chez *Chemin long*, de la part de l'azote total prise par les graines.

OBSERVATIONS SUR LES GRAINES

A. *Production totale en poids vert et répartition suivant les calibres*

Si l'on considère la production absolue des 50 pieds étudiés (fig. 6), exprimée en grammes, on note une différence de comportement des deux variétés.

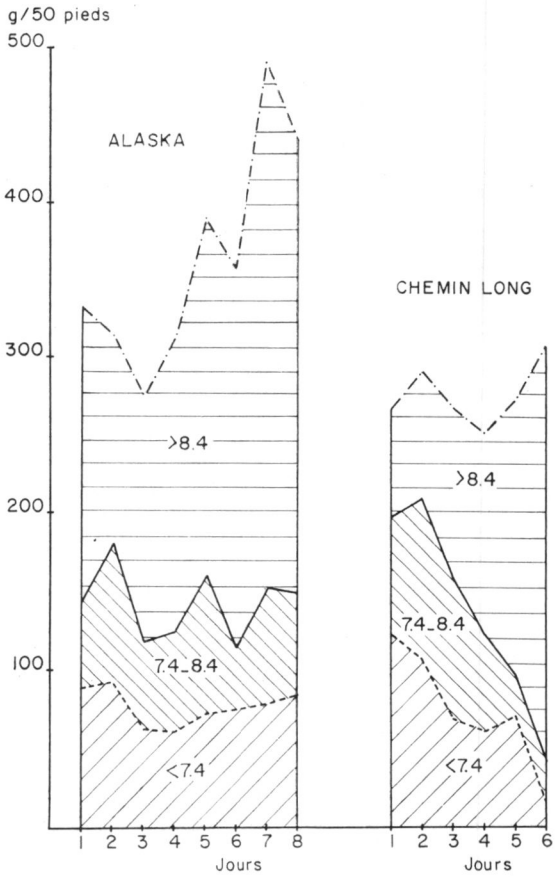


FIG. 6. — *Production totale en vert et répartition par calibre*

Pour *Alaska*, il y a une tendance très nette vers l'augmentation du poids allant de 274 g à 492 g. Au contraire, pour *Chemin long*, la variation est plus faible (de 250 g à 307 g) et cette différence ne peut être attribuée à une évolution mais plutôt à des « erreurs » d'échantillonnage.

De plus, chez *Alaska*, l'augmentation du poids total s'accompagne surtout d'une augmentation des pois de gros calibre (fig.6), les extra-fins (< 7,4) variant peu en valeur absolue mais passant évidemment de 30 p. 100 à 20 p. 100 en valeur relative (fig. 7).

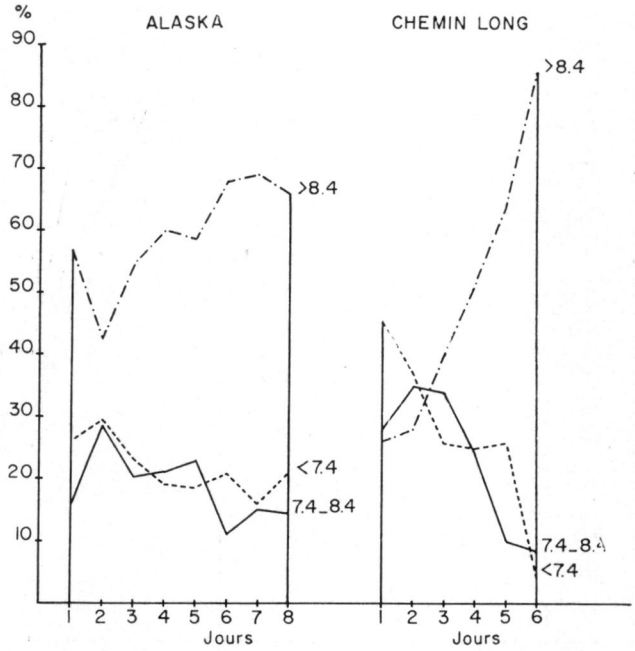


FIG. 7. — *Répartition de la production verte dans les divers calibres en p. 100 de la production totale verte*

La maturation de *Chemin long*, au contraire, s'accompagne d'une chute spectaculaire des calibres les plus fins, les gros arrivant à représenter 87 p. 100 de la production (fig. 7). Dans le cas de ces derniers, le choix du moment de la cueillette est donc plus important puisque, avec le système de réception actuellement en vigueur, le vieillissement du grain s'effectue sans augmentation globale du poids et avec une perte très sensible de la « qualité » représentée par les extra-fins.

On pourrait expliquer cette différence par le fait que la variété *Alaska* a une floraison très étalée, et que, au cours du vieillissement, on cueille des pois d'âges différents avec une production continue de pois jeunes.

B. *Évolution de l'eau*

La figure 8 reproduit, pour les divers calibres et pour l'ensemble, les variations au cours du temps de la teneur en eau, exprimée en pour cent de la matière sèche.

Elle indique que cette donnée, simple, est, pour une date de prélèvement donnée; caractéristique du calibre et que son évolution, de jour en jour, est assez nette pour que l'on puisse éventuellement choisir une valeur repère.

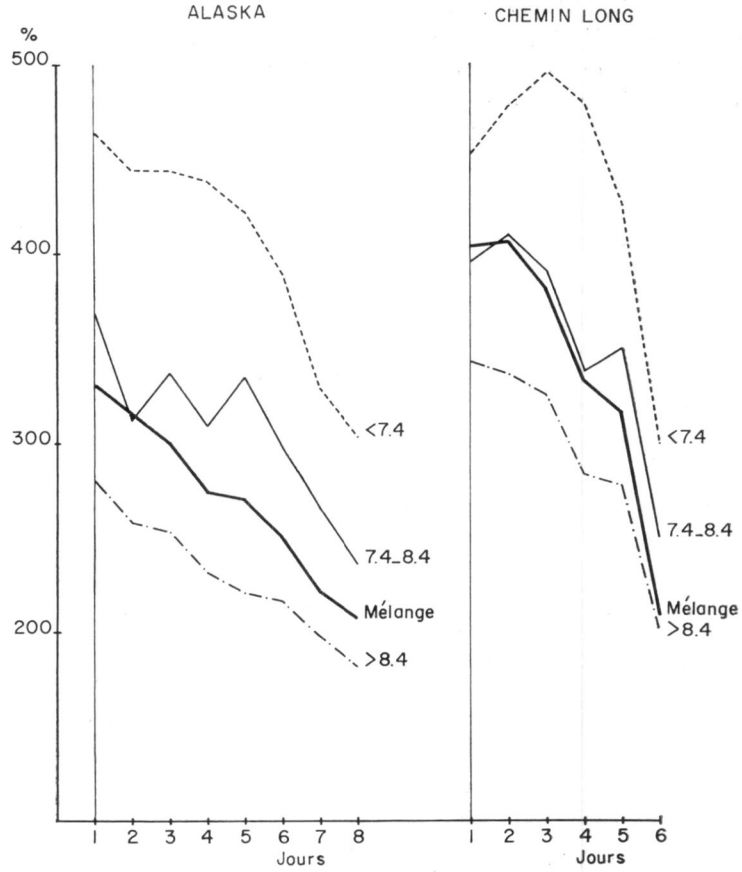


FIG. 8. — *Teneur en eau p. 100 de matière sèche des différents calibres et du mélange*

Il faut, en effet, un décalage d'au moins quatre jours, sinon six, pour que la teneur en eau d'un calibre soit identique à celle d'un calibre plus grossier.

De plus, la variation est considérable et relativement régulière (sauf pour le calibre 7,4-8,4 d'*Alaska*).

Pour l'échantillon moyen — sans séparation en calibres — on observe une variation de :

331 p. 100 à 207 p. 100 chez *Alaska*
404 p. 100 à 209 p. 100 chez *Chemin long*

avec une grande chute pour cette variété au cours du dernier jour.

Dans l'ensemble, *Chemin long* paraît plus riche en eau bien que l'on puisse trouver des périodes où les valeurs obtenues avec les mêmes calibres d'*Alaska* soient comparables et nous pensons que cette richesse en eau devrait pouvoir être rapprochée d'une qualité du pois de conserve d'autant plus que, comme nous allons le voir, sa diminution s'accompagne d'une augmentation de la richesse en amidon.

C. *L'insoluble alcool*

1) *Pour cent vert* .

La méthode utilisée par HUET et LEDERGERBER fournit la quantité de matières insolubles dans l'alcool à 80°, parmi lesquelles l'amidon est le principal constituant.

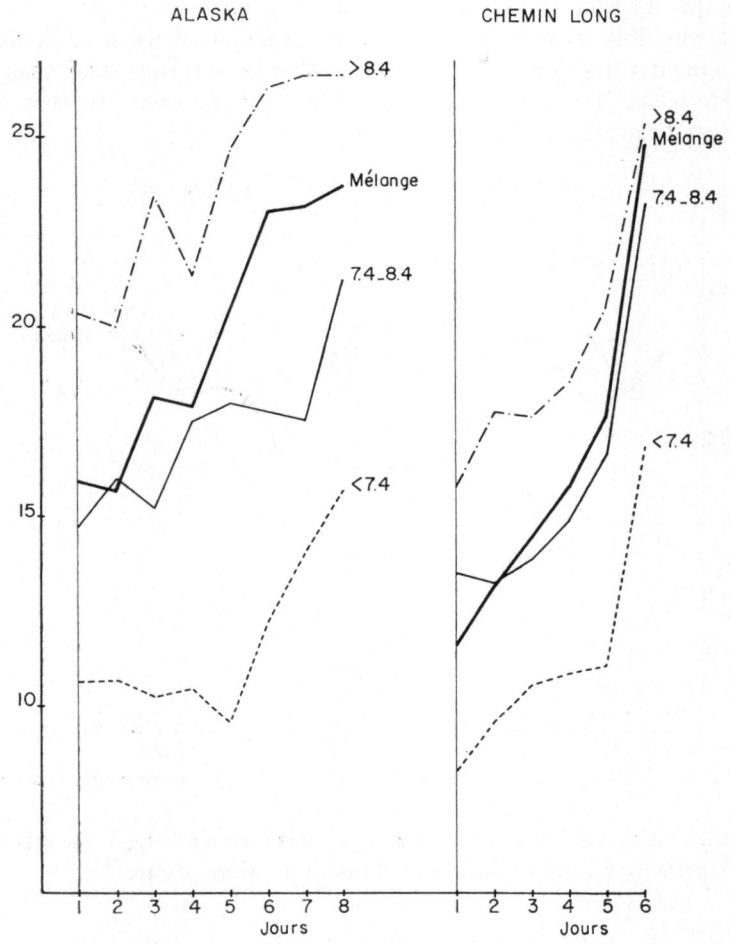


FIG. 9. — *Matières insolubles alcool g/100 g vert de chaque fraction et du mélange nature*

Le graphique 9 représente les variations de l'insoluble alcool sec exprimé en grammes pour 100 g de matière verte de chaque calibre et du mélange naturel (reconstitué par le calcul).

Si l'on trouve dans les deux variétés des chiffres comparables pour les calibres les plus fins (< 7,4), on voit que le calibre 7,4-8,4 d'*Alaska* a des caractéristiques voisines du calibre > 8,4 de *Chemin long*. Donc la seule différenciation par calibre ne paraît pas suffisante.

Ceci se retrouve dans la variation de l'insoluble du mélange qui est beaucoup plus faible au départ chez *Chemin long* que chez *Alaska*. L'évolution est cependant rapide dans les deux cas.

2. Pour cent sec.

Nous avons vu précédemment l'importance prise par l'eau au cours de la maturation. La variation des données précédentes, rapportées à la matière verte, pourraient donc n'être que le reflet de la teneur variable en eau.

Nous avons donc ramené les valeurs de l'insoluble alcool à la matière sèche. La figure 10 montre que l'on obtient alors des valeurs, comprises entre 50 et 80 p. 100 de la matière sèche, beaucoup plus comparables entre les deux variétés, mais dont l'évolution est beaucoup moins caractérisée.

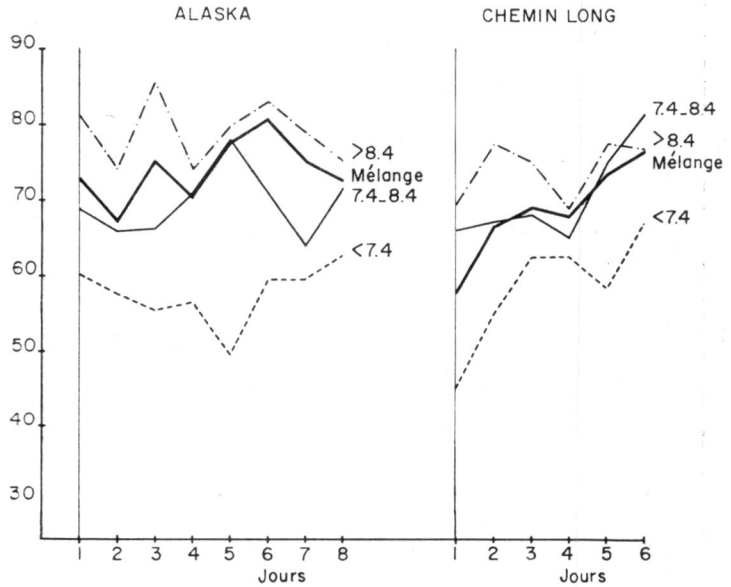


FIG. 10. — *Matières insolubles alcool g/100 g sec de chaque fraction et du mélange*

Il y a cependant une tendance, assez nette chez *Chemin long*, à une augmentation de la place prise par l'insoluble alcool dans la matière sèche.

D. *Soluble alcool*

L'insoluble alcool, d'après les observations précédentes, semble varier en fonction inverse de la teneur en eau. Pour essayer de mieux comprendre ce mécanisme, nous avons pensé étudier le complément de cette valeur, c'est-à-dire le soluble alcool qui, lui, tient compte de la teneur en eau.

L'insoluble, en effet, est représenté par un poids de matière sèche que l'on a exprimé en pour cent du poids vert. Si l'on calcule la différence entre le poids vert et la fraction insoluble pesée, on obtient la fraction soluble dans laquelle se trouve l'eau du végétal. En retranchant le poids d'eau contenu dans la matière verte, on

obtient les « substances solubles sèches ». Le mode de calcul montre que les valeurs obtenues sont entachées de toutes les erreurs expérimentales et de dosages.

Si l'on reporte, *sur un même graphique* (graph. 11) les chiffres de « substances solubles sèches » *des deux variétés*, et *de tous calibres*, en fonction de la quantité d'eau contenue dans la fraction analysée, on s'aperçoit qu'à part quelques points paraissant nettement aberrants, on obtient une répartition permettant de calculer une droite de régression.

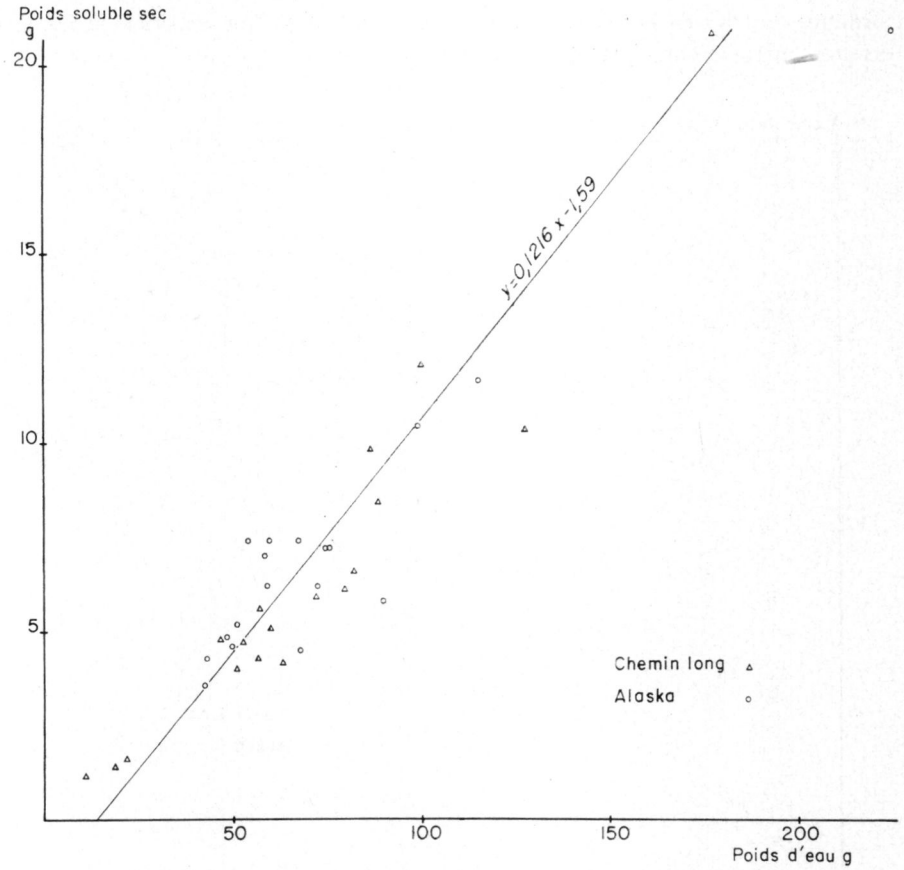


FIG. 11. — *Relation entre le poids de substances solubles à l'alcool et le poids d'eau du même échantillon*
(Variétés et calibres mélangés)

Le calcul donne, pour l'ensemble des deux variétés, l'équation suivante :

Matières solubles alcool 80° contenues dans la fraction et exprimées en matière sèche = 0,1216 × Poids d'eau de la fraction — 1,59.

On arrive ainsi à la conclusion que les « matières solubles sèches » représentent, en moyenne, pour les deux variétés et tout au long de la période observée, 12 p. 100 de l'eau contenue dans le grain.

Ceci entraîne, en conséquence, que les matières insolubles à l'alcool à 80° peuvent être obtenues par l'une des relations suivantes :

$$MIA = MV - 1{,}12 \text{ poids d'eau} + 1{,}59$$

ou

$$MIA = MS - 0{,}12 \text{ poids d'eau} + 1{,}59$$

Le graphique 12 sur lequel on a porté en abscisses les MIA mesurées et en ordonnées les MIA calculées suivant une des équations précédentes, indique une bonne concordance (autour de la première bissectrice) surtout si l'on considère à nouveau les erreurs qui peuvent s'attacher à de telles mesures.

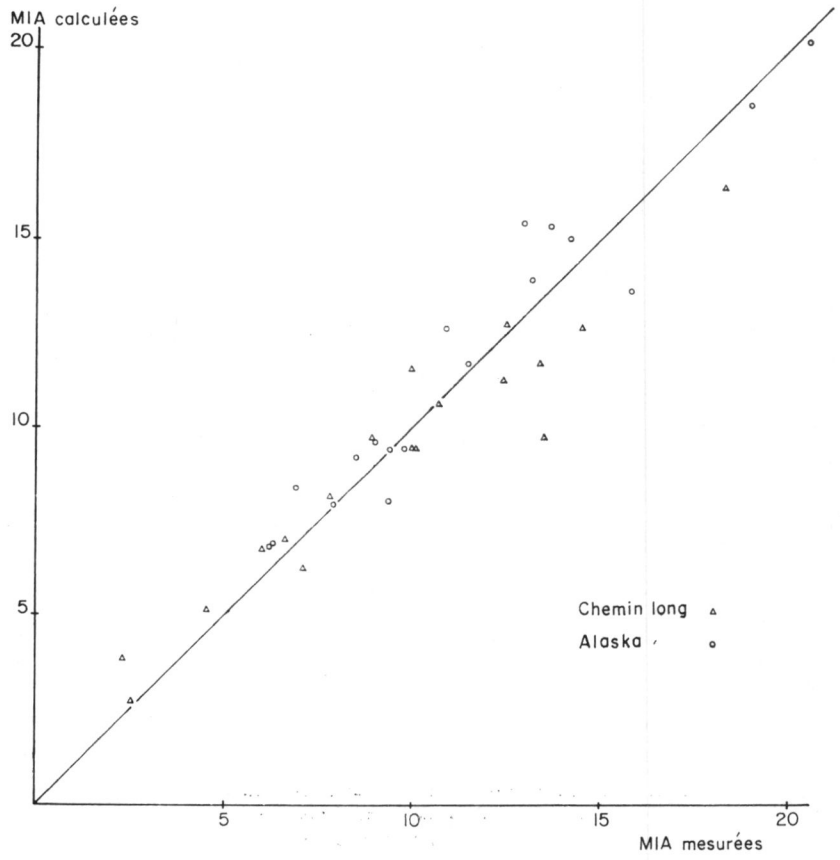


FIG. 12. — *Comparaison des M. I. A. calculées aux M. I. A. mesurées*

On peut donc dire que l'insoluble alcool dans les graines peut se déduire de la quantité d'eau présente dans l'échantillon analysé.

Or, nous avons vu que cette quantité d'eau pouvait caractériser les différents calibres et leur état de maturité. Cette relation explique alors le comportement de ces calibres et les différences, observées entre variétés, des matières insolubles à l'alcool,

car à teneur en eau égale, quel que soit le calibre ou la variété, on trouve des MIA comparables.

Cette observation confère à la mesure de l'humidité une nouvelle importance, puisqu'elle semble gouverner une bonne partie des propriétés du pois.

E. *Azote*

Rappelons que la proportion de l'azote total du végétal entier, contenue dans les graines, varie, au cours de la maturation,

de 30 à 55 p. 100 chez *Alaska*
de 30 à 47,5 p. 100 chez *Chemin long*.

On ne parlera pas de la répartition de cet azote entre les différents calibres car elle serait trop influencée par la part variable prise par chacun d'eux.

Nous étudierons, plutôt pour chaque calibre, l'évolution du fractionnement de cet azote en soluble et insoluble alcool.

Le graphique 13 montre que le pourcentage d'azote soluble, passe, pour chaque calibre et évidemment pour le mélange, par un maximum et cela dans les deux variétés.

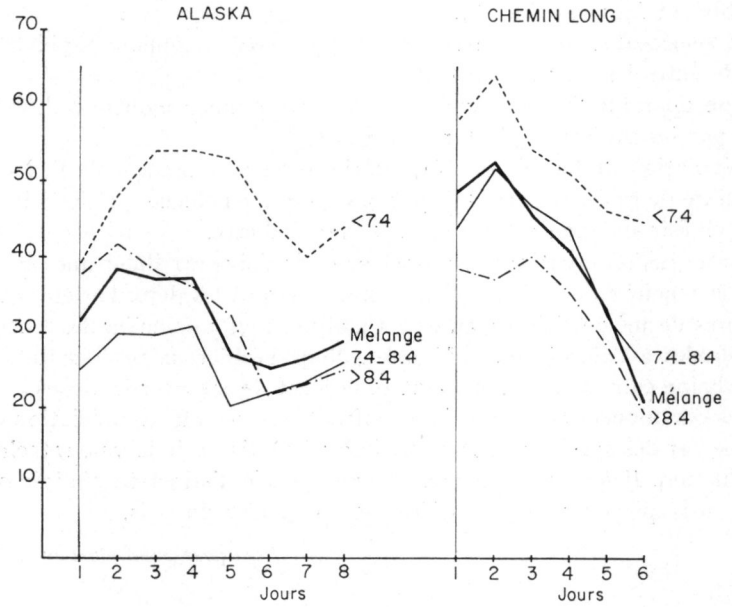


FIG. 13. — *Variation de l'azote soluble alcool en p. 100 de l'azote total des différentes fractions et du mélange*

La fraction soluble serait plus importante chez *Chemin long* (plus riche en eau) mais on peut trouver, pour chaque calibre, des périodes où l'on a des chiffres comparables.

Cette donnée, ayant une variation en cloche, pourrait également fournir un repère dont le choix devrait toujours se référer à un critère de qualité.

F. *Conclusion*

L'étude précédente permet de faire ressortir les points suivants :

1° La répartition de la matière verte du végétal entier entre fanes, gousses et graines montre une augmentation régulière de la part prise par les graines, mais les différences séparant deux prélèvements rapprochés ne sont pas très importantes (fig. 1).

2° La matière sèche du total des graines croît régulièrement et de façon sensible (fig. 2). Cette variation est encore plus nette lorsqu'elle est suivie séparément sur chaque calibre.

3° La répartition de l'eau totale du végétal entre les différentes parties ne présente pas de variations caractéristiques (fig. 3).

4° La part de l'azote total du végétal contenue dans les graines augmente régulièrement (fig. 4).

5° Le seul critère de qualité utilisé actuellement, séparant les graines en trois calibres, laisserait une marge de choix dans le jour de cueillette, importante pour *Alaska* dont la quantité d'extra-fins reste assez constante, et très faible pour *Chemin long* (fig. 5).

6° Les variations de la richesse en eau pourraient caractériser à la fois les différents calibres et leur âge (fig. 8).

7° Le pourcentage de matières insolubles alcool augmente rapidement et de façons différentes suivant le calibre.

L'étude approfondie de la variation de cette donnée montre qu'elle peut être expliquée par les variations de teneur en eau.

8° L'évolution de l'azote soluble, exprimée en pourcentage de l'azote total de chaque calibre de graines, se traduit par une courbe en cloche qui devrait permettre de mieux choisir un moment convenable de cueillette.

De toutes ces observations, il ressort que l'on doive attribuer une place prépondérante à la teneur en eau des graines. En comparant les deux variétés et les différents calibres de même richesse en eau, on obtient en particulier des teneurs en matières insolubles à l'alcool peu différentes. Nous vérifierons ces résultats au cours d'une prochaine campagne en essayant également de mesurer la richesse en sucres.

Toutes ces données devraient être confrontées avec une appréciation de la qualité, réalisée par des spécialistes pouvant juger du goût et de la valeur technologique de la production. Il semble actuellement que la seule distinction réalisée par le calibrage ne puisse préjuger, entre variétés, de la qualité du pois.

Reçu pour publication en avril 1965

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE MATURATION ON THE PLANT OF TWO VARIETIES OF PEAS FOR CANNING

The authors studied, during the maturation of two varieties of peas for canning industry, the variations of simple data (repartition of the green matter, contents in water, insoluble alcohol and nitrogen), which could eventually either characterize the time most appropriate for the harvest or be linked up with a notion of quality, yet to be defined.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DER REIFUNG AUF DER WACHSENDEN PFLANZE ZWEIER SORTEN VON EINMACHERBSEN

Die Autoren verfolgten während der Reifung zweier Erbsensorten für die Konservenindustrie die Veränderungen einfacher Daten (Verteilung der Grünmasse, Gehalt an Wasser, an unlöslichem Alkohol, an Stickstoff) die eventuell die günstigste Erntezeit kennzeichnen, oder sich mit einem noch zu bestimmenden Qualitätsbegriff verbinden lassen.

К изучению созревания на местах двух сортов зеленого горошка для консервов.

Г. ЛЕФЭВР и Г. ХИРУ.

РЕЗЮМЕ

Авторы проследили изменения простейших данных (распределение зеленой массы, содержание воды, нерастворимого спирта, азота) в течении созревания двух сортов зеленого горошка для консервов; с помощью этих данных возможно при случае указать благоприятную для сбора урожая эпоху, или предвидеть необходимое в данном случае качество.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

HUET R., LEDERGERBER A., 1963. Études sur la sélection de diverses variétés de pois en vue de la mise en conserve. *Al-Awamia.*, 147-162.

LEFÈVRE G., HIROUX G., 1961. Effets de fumures azotées et potassiques différenciées sur la production de petits pois de conserverie. *C. R. annuel des stations agronomiques*: A - 13 A.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques, etc.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abréviations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs,* précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement,* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction,* dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé,* en donnant, sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats,* à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour les collaborations, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques.*

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc.) l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date du parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World List of Scientific Periodicals, ou le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention de « communications personnelles » ou « données non publiées » etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d'« Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit.

Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets,* leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5 *soit* × 0,25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. CHAMINADE, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise) France. On demande deux exemplaires.

AGRONOMIQUE.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 5

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle, Paris-7e

Ann. agron., 1965, **16** (5), 471-534.

ACTION DES MATIÈRES ORGANIQUES SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE DES SOLS (1)

G. MONNIER

avec la collaboration technique de C. JEANDET

Laboratoire des Sols
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

DEUXIÈME PARTIE (2)

---

(1) Ce travail a fait l'objet d'une thèse de Docteur-Ingénieur, soutenue le 20 mars 1965, à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris

(2) La première partie de ce mémoire est parue dans le n° 4/1965 des Annales agronomiques.

Introduction

Dans la première partie de ce travail, nous nous sommes efforcés d'analyser le mécanisme des différents modes d'action des matières organiques sur la stabilité de la structure des sols.

Nous allons maintenant confronter aux conditions de la pratique les règles ou les tendances qui ont pu être dégagées. Cette orientation nous a paru fondamentale : elle est en effet le seul moyen de vérifier qu'au laboratoire nous avons isolé des mécanismes réellement fondamentaux et non subordonnés aux conditions particulières de l'étude. Par ailleurs cette transposition doit nous permettre de déboucher sur l'action technique et de retirer ainsi les bénéfices pratiques des résultats obtenus.

Mais l'attitude que l'on peut adopter du point de vue de l'étude des phénomènes est alors bien différente surtout dans un domaine aussi complexe. Certes dans le protocole des essais ou dans le choix des observations on s'efforce de comparer un ou plusieurs traitements et un témoin. Malheureusement les objets de l'expérience vont provoquer des actions très diverses dans le milieu si bien que l'on ne peut plus dire que l'on isole des variables indépendantes ; pour les modifier on provoque un changement global qu'il faut analyser.

C'est ainsi que chaque technique culturale faisant intervenir un type d'apport de matières organiques devra faire l'objet d'une étude particulière dans laquelle nous nous efforcerons de mettre en évidence les différents effets du traitement dont, bien entendu, ceux qui ont entraîné une modification de la stabilité structurale du sol.

I. *Rôle complexe des matières organiques dans le sol en place*

La méthode d'appréciation de la stabilité structurale des sols sur laquelle nous nous sommes appuyé au cours de la première partie de ce mémoire permet de mettre en évidence les modifications de comportement du sol vis-à-vis de l'eau dans des conditions standard qui reflètent, il faut le souligner, celles qui prévalent d'une manière très générale au sein de la couche arable d'un sol considéré dans son ensemble et par rapport à un climat déterminé. Il n'empêche que le comportement du sol en place peut être également influencé par des facteurs secondaires qui jouent en modifiant l'agressivité de l'eau. Par exemple, pour une stabilité donnée, la structure se dégradera plus ou moins rapidement suivant que la configuration générale du profil du sol permettra un contact plus ou moins prolongé entre chaque particule de terre et l'eau en excès. Aussi, nous semble-t-il nécessaire, avant de rechercher si les mécanismes dont nous avons parlé interviennent bien dans les conditions de la pratique, de passer en revue les influences moins directes que peuvent avoir les techniques culturales basées sur l'utilisation des matières organiques, vis-à-vis du comportement du sol.

a) *Actions mécaniques des débris organiques.*

L'incorporation de débris végétaux à un sol cultivé peut avoir des conséquences diverses selon les modalités techniques de l'enfouissement. Suivant que les débris seront localisés au fond du labour ou incorporés en bandes obliques leur présence aura des répercussions fort différentes sur l'infiltration superficielle et la circulation de l'eau de pluie.

D'autre part lors des processus de reconstitution de la structure qui se déclenchent au cours des périodes de gel ou des successions d'humectation et de dessiccations, la présence de débris organiques crée des hétérogénéités et donc des points de rupture favorisant la création d'éléments structuraux de taille plus fine. Ce mécanisme aura évidemment des résultats d'autant plus importants que la répartition des débris sera plus régulière dans la masse de terre intéressée.

b) *Apparition de phénomènes de réduction.*

Les fermentations qui se produisent au sein des matières organiques libres enfouies consomment l'oxygène de l'atmosphère du sol. Si la diffusion de l'oxygène est plus faible que sa consommation dans le milieu, ce dernier devient rapidement asphyxiant et il a été montré par divers auteurs (R. Bétrémieux et R. Gras 1957) qu'il se produisait alors une dispersion du complexe argilohumique aboutissant à une dégradation structurale plus ou moins intense. L'apparition de tels phénomènes dits « gley » est sous la dépendance étroite des possibilités d'aération au niveau des matières enfouies ; la plus ou moins grande profondeur à laquelle ces matières ont été localisées, la porosité et l'humidité du sol à ce même niveau, enfin les possibilités de renouvellement de l'air dans la zone de fermentation sont donc autant de facteurs qui commandent la gleyfication.

c) *Action sur la faune du sol.*

Les vers de terre, acariens, collemboles, etc. qui existent dans le sol, voient leur activité augmenter par des apports de matière organique fraîche qui constitue pour eux une source d'alimentation. Ces animaux jouent plusieurs rôles aussi bien directement sur la structure que sur la stabilité structurale.

En ce qui concerne le premier point, les galeries que certains d'entre eux creusent dans le sol maintiennent dans les couches où ils vivent une porosité pouvant compenser l'effondrement de la structure survenant en raison d'une stabilité structurale insuffisante. Les galeries de vers de terre, particulièrement, jouent tous les rôles habituellement dévolus à la fissuration naturelle du sol. Elles assurent la circulation de l'eau : le phénomène est particulièrement visible lorsqu'on observe une tranchée récemment ouverte dans un sol gorgé d'eau mais dont la masse est peu perméable ; on peut alors remarquer que les canaux de vers de terre se comportent comme des petits drains. Ces galeries assurent également la circulation de l'air : on en tiendra pour preuve le fait que dans une couche où prévaut un milieu réducteur, ce sont les parois des galeries de vers qui se réoxydent les premières, le phénomène se concrétisant par l'apparition d'un manchon d'oxyde de fer autour de ces cavités. Enfin, les racines des végétaux cultivés empruntent fréquemment ces voies de pénétration dans les sols dont la structure est continue ou à l'occasion du franchissement de

certains obstacles localisés (fonds de labour lissés par le talon de la charrue par exemple).

Mais les petits animaux du sol jouent également un rôle en assurant le brassage de la terre entre les différentes couches du sol ; c'est ainsi que sous les prairies permanentes où les conditions de milieu (absence de travail du sol, abondance de matières organiques fraîches) favorisent la pullulation des vers de terre, nous avons pu récolter dans le sous-sol une proportion de plus de 5 p. 100 de terre de surface provenant des déjections déposées lors de la descente de ces animaux dans les couches profondes du sol. Le tableau 14 montre quel est l'ordre de grandeur de l'amélioration structurale d'un sous-sol de prairie par cette action.

TABLEAU 14

Importance du mélange des couches de sol par les vers de terre

Sologne Fosse n° 2	Ag_a %	Ag_e %	Ag_b %	S	K	C lié °/₀₀
Sol	10,9	5,0	10,6	1,12	5,12	25,6
Sous-sol (moyenne)	4,8	2,7	0,8	4,25	1,85	
Sous-sol (déjections de vers)	15,3	8,1	10,5	1,00	2,80	32,9
Sous-sol (sans déjections)	3,5	1,9	0	5,17	1,63	10,4

Enfin, la faune du sol assure la fragmentation et le mélange à l'ensemble de la masse du sol des matières organiques fraîches qui viennent d'y être incorporées et ainsi participe dans une large mesure à l'action de ces dernières sur la stabilisation de la structure. On peut également noter que certains auteurs (1) ont mis en évidence la contribution de diverses espèces aux processus d'humification ; à ce titre également, la faune du sol joue un rôle moins bien défini, mais vraisemblablement important, en accroissant l'efficacité des apports organiques.

Il apparaît donc que l'enfouissement de matières organiques peut avoir sur l'ensemble des propriétés physiques du sol des conséquences très diverses qui s'ajoutent à la stabilisation de la structure.

Tout au long de cette deuxième partie, cet aspect de la question avec ses incidences favorables ou défavorables sera rappelé. Dans de nombreux cas en effet, l'action directe sur la stabilité de la structure ne représente qu'une part infime de l'efficacité d'une technique basée sur l'utilisation des matières organiques. La transposition des résultats des seuls tests de stabilité ne parviendrait pas à rendre compte des modifications radicales de comportement du sol observées à la suite de l'application d'une telle technique.

(1) MEYER L., (1943) ; FRAUG H. et LEITENBERGER L. (1948) ; AVEL M. (1929) ; BACHELIER G. (1961).

II. *Méthodes complémentaires*

L'introduction de ces nouvelles données dans notre étude en milieu naturel implique l'utilisation de méthodes permettant de les analyser.

Nous devons, tout d'abord, constater un certain nombre de difficultés résultant de la complexité du sol et de ses hétérogénéités, difficultés qui se manifestent lors des observations du sol en place et lors des prélèvements d'échantillons. Certaines variations sont aléatoires : d'un point à un autre, pour un ensemble de causes imprévisibles les propriétés du sol changent. Il suffit alors théoriquement de se borner à l'étude d'une parcelle plus petite mais homogène. Dans le cas où cette solution est impraticable du fait de l'exiguïté des zones homogènes, on doit multiplier les observations et les prélèvements de façon à obtenir une représentation moyenne de la parcelle étudiée. S'il s'agit là d'un problème commun à toutes les sciences du milieu naturel, il faut souligner toutefois que l'hétérogénéité en physique du sol aboutit fréquemment à des variations telles qu'une étude précise devient extrêmement laborieuse et dans certains cas pratiquemment impossible.

Mais il existe aussi une hétérogénéité systématique. Dans une première dimension, selon la profondeur, l'observation permet de mettre en évidence des couches différenciées qui devront bien entendu faire l'objet d'échantillonnages séparés ; par exemple l'étude de la stabilisation sous une prairie devra tenir compte du fait que les différentes couches du sol sont très différemment exploitées par les racines et sont donc diversement enrichies en matières organiques. Mais des hétérogénéités systématiques peuvent également, et cela même dans le cas d'une parcelle plane, exister latéralement. C'est ainsi que le travail du sol, un labour par exemple, peut occasionner la localisation en bandes d'une matière enfouie et qu'il sera nécessaire de tenir compte de ce fait pour une juste appréciation des modifications du sol qui peuvent en résulter.

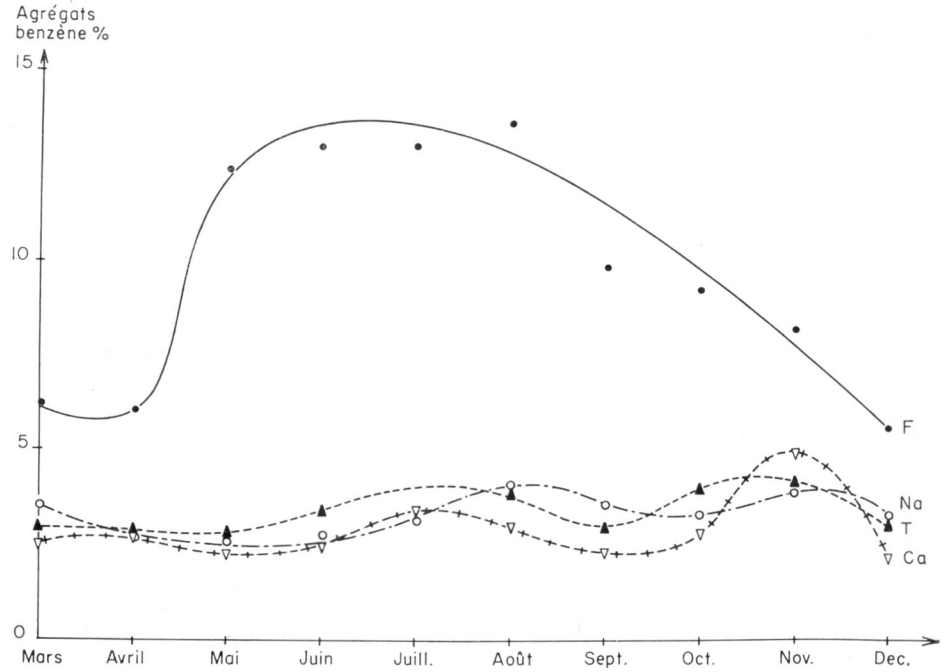
Enfin, on doit tenir compte des variations dans le temps et particulièrement au cours d'une même année, de la stabilité structurale. S. Hénin et L. Turc (1949) ont déjà mis en évidence ce phénomène. Le graphique suivant (23), que nous avons établi à partir de mesures mensuelles effectuées sur le dispositif dit, des 42 parcelles, au C. N.R. A. de Versailles indique clairement que ces variations saisonnières sont pour une grande part dues à l'évolution des matières organiques selon les conditions de température et d'humidité des différents mois de l'année et que par conséquent, toute étude visant à rechercher les variations d'une année sur l'autre de la stabilité du sol à la suite de l'incorporation de matières organiques doit tenir le plus grand compte de ces variations ; la date du prélèvement doit être fixée une fois pour toutes à une période de l'année où les variations mensuelles sont faibles.

Il apparaît ainsi que les servitudes résultant de ces hétérogénéités nous conduisent, elles aussi, à utiliser des méthodes complémentaires qui auront donc un double but : d'abord permettre le prélèvement d'un matériau bien déterminé pris dans un cadre connu, ce qui est une condition indispensable à l'interprétation des résultats de son étude au laboratoire ; ensuite faire la part entre l'action directe, sur la structure, de l'incorporation au sol d'une matière organique et l'action sur la stabilité structurale dont les conséquences culturales à court terme peuvent être masquées par les actions du premier type.

La plus importante de ces méthodes d'étude repose sur l'*examen du profil cul-*

tural. Ce dernier peut être défini comme : « l'ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines de végétaux et des facteurs naturels réagissant à ses actions ». (S. HÉNIN et coll., 1960).

L'examen de ce profil suppose l'ouverture d'une tranchée dont les dimensions et la profondeur sont fonction de la dimension des hétérogénéités portant sur l'une quelconque des caractéristiques du sol. Une paroi bien éclairée de la tranchée sera ensuite « préparée » à l'aide d'un couteau qui, manié convenablement, permettra



GRAPHIQUE 23. — *Variations saisonnières du taux d'agrégats Ag₀% pour différents sols*
T : témoin sans fumure
F : parcelle recevant du fumier
Na : parcelle recevant du nitrate de sodium
Ca : parcelle chaulée ($CaCO_3$)

de faire réapparaître la disposition naturelle des éléments constitutifs, disposition masquée dans la plupart des cas par le lissage des outils lors de l'ouverture de la tranchée. On notera alors systématiquement un certain nombre de points :

— L'humidité du sol et particulièrement la présence d'eau libre à certains niveaux.

— La texture, appréciée au toucher, et la présence d'éléments grossiers.

— La forme, la compacité et la dureté (si le sol est sec) des éléments structuraux c'est-à-dire des masses de terre dont le volume est délimité par des fissures. Il sera en même temps noté la trace du travail des outils de culture (semelle de labour, de façon superficielle, etc.).

— La répartition et l'état des matières organiques libres dans le profil ; on

s'attachera plus particulièrement à l'aspect, à la consistance et à l'odeur de ces substances ainsi qu'à la couleur du sol immédiatement à leur contact. Observations permettant de diagnostiquer la présence de gley.

— La présence de taches de rouille, de concrétions permettant de déduire que le sol a subi une phase réductrice.

— Enfin, la répartition, la forme et l'état sanitaire des racines, éventuellement dans le cas d'un sol sous culture au moment de l'observation.

Cet examen permettra un prélèvement judicieux d'échantillons ; mais, de plus, l'observateur pourra relever un certain nombre de symptômes caractérisant l'état du sol au moment de l'observation. Il s'agit là d'une démarche qui s'apparente à plus d'un titre à celle du médecin : l'intervention débute par un examen systématique ; puis, la recherche de la convergence de plusieurs symptômes ou de la dominance de l'un d'entre eux permet dans certains cas de prononcer un diagnostic. Dans le cas où ce dernier n'est pas possible par suite de moyens d'investigation insuffisants ou d'une connaissance imparfaite du phénomène dominant, il reste une analyse systématique de la situation qui seule pourra permettre de replacer dans leur cadre et d'interpréter correctement les résultats de l'étude complémentaire au laboratoire.

Il est évidemment nécessaire d'utiliser en plus et à l'appui de cet examen tout le jeu des méthodes statistiques de contrôle des observations et des expérimentations, ceci afin de tenir compte des variations aléatoires inhérentes au milieu naturel.

Enfin, on ne saurait trop insister sur la nécessité d'une collaboration des différentes disciplines qui s'occupent du sol. L'introduction d'une technique nouvelle peut en effet modifier une caractéristique du sol non seulement par une voie directe décelable par les méthodes en usage dans la discipline directement intéressée, mais aussi par des voies détournées, telles que l'interaction en chaîne de plusieurs facteurs ; dans ce dernier cas, une analyse en équipe du phénomène aura plus de chance de fournir une explication et donc de permettre la généralisation éventuelle du résultat.

CHAPITRE PREMIER

ÉTAT ET ÉVOLUTION DES MATIÈRES ORGANIQUES DANS LE SOL

La matière organique d'un sol cultivé provient essentiellement des débris végétaux laissés par les différentes récoltes ou d'amendements organiques divers apportés par l'homme.

Au cours d'un premier stade, ces débris, encore peu décomposés, sont seulement juxtaposés à la masse minérale du sol dont ils peuvent être séparés assez facilement par la méthode densimétrique que nous avons décrite (p. 345). Cette première fraction organique peut être globalement caractérisée par un rapport C/N variable suivant sa nature, mais généralement élevé, et par le fait qu'elle est susceptible d'une évolution rapide lorsque les conditions sont favorables.

Dans ce dernier cas, sous l'action des micro-organismes du sol, ces débris végétaux subissent des transformations fermentatives dont les produits se fixent aux constituants minéraux du sol. Cette deuxième fraction, dite liée, présente, dans son ensemble, un rapport C/N constant et voisin de 10. De plus, ces matières organiques liées sont en majorité biologiquement stables à court terme. Elles possèdent donc l'ensemble des propriétés rattachées à la notion d'humus et l'on peut dans une première approximation dont nous examinerons plus loin les limites, confondre les deux définitions.

Étant donné que nous disposions d'une méthode permettant une séparation de ces deux types de matières organiques, nous avons cherché en collaboration avec S. HÉNIN et L. TURC à étudier séparément leur dynamique dans le sol (1959). Nous nous sommes basés sur une formule proposée par HÉNIN et DUPUIS (1945) qui traduit la dynamique des matières organiques totales du sol et que nous avons appliquée successivement à chacune des deux fractions. Signalons que dans une mise au point récente (KORTLEVEN, 1963) cette formule est reconnue comme reflétant de façon satisfaisante l'évolution réelle de la teneur en matière organique des sols.

Si A représente le stock de matières organiques labiles présent dans le sol, m l'apport annuel et α un paramètre de « disparition » de la matière organique sous forme libre, la formule d'HÉNIN et Dupuis revient à écrire, t représentant le temps :

$$\frac{dA}{dt} = m - \alpha A$$

d'où

$$A = \left(Ao - \frac{m}{\alpha}\right) e^{-\alpha t} + \frac{m}{\alpha}$$

Lorsque le temps croît indéfiniment le stock de matières organiques libres tend vers une valeur à l'équilibre $A = \frac{m}{\alpha}$.

Quelques valeurs du coefficient α établies approximativement à partir d'une appréciation de A et de m dans quelques situations caractéristiques à l'équilibre sont rassemblées dans le tableau 15.

TABLEAU 15

Valeurs du coefficient α
(d'après S. HÉNIN, G. MONNIER et L. TURC (1959)
(Unité de temps : l'année)

Désignation des sols	Valeurs de α
Sol en bon état de culture	0,5 à 1
Rendzine sols humides	0,1 à 0,02
Sols acides, Terres de bruyère. Horizon A_0 de podzol	de l'ordre de 0,03

Ces chiffres signifient que si dans les conditions normales des terres cultivées ($\alpha = 1$) le sol ne contient sous forme libre que les matières organiques incorporées dans l'année, dans les conditions défavorables (excès de sécheresse ou d'humidité... acidité prononcée... etc.), il se produit une accumulation de matières organiques libres. Il suffit généralement de modifier le milieu par un drainage ou un travail du sol par exemple pour augmenter α, c'est-à-dire accélérer la transformation de ce stock inerte en matières liées actives. Cette réserve peut donc être considérée comme une potentialité dont l'utilisation dépend du choix des techniques culturales appropriées.

Si nous désignons maintenant par B la matière organique liée assimilable à l'humus, nous pouvons écrire, toujours suivant le même schéma et compte tenu de ce qui précède :

$$\frac{dB}{dt} = k_1 \alpha A - k_2 B$$

ou k_1 représente le coefficient isohumique, c'est-à-dire le rendement en humus de la matière organique labile αA évoluant pendant l'unité de temps.
et k_2 un paramètre de destruction de l'humus par minéralisation.

D'où, en remplaçant A par sa valeur et en intégrant :

$$B = \left(Bo - \frac{k_1 m}{k_2}\right) e^{-k_2 t} + k_1 \left(Ao - \frac{m}{\alpha}\right) (e^{-k_2 t} - e^{-\alpha t}) + \frac{k_1 m}{k_2}$$

Le niveau humique d'un sol à l'équilibre est donc égal à $k_1 m / k_2$.

De nombreux auteurs se sont attachés à déterminer les ordres de grandeurs des deux paramètres k_1 et k_2. En ce qui concerne ce dernier les valeurs de loin les plus fréquentes se situent entre 0,008 et 0,012, avec des valeurs extrêmes de 0,004 et 0,04.

Le tableau 16 ci-après rassemble quelques valeurs de k_1.

On constate d'abord que les valeurs de k_1 varient suivant la nature des apports organiques. Un fumier bien décomposé par exemple présente un coefficient isohumique plus élevé qu'un fumier pailleux ; un engrais vert pauvre en lignine, composé nécessaire à l'élaboration de l'humus (BREMNER, FLAIG, FORSYTH) et riche en hydrate de carbone très fermentescible, a un rendement humique à peu près nul.

TABLEAU 16

Valeurs du coefficient isohumique k_1

Matières organiques	Coefficient k_1	Remarques
Parties de céréales	0,08 à 0,20	
Résidus de prairies temporaires et artificielles	0,15 à 0,30	Suivant état de décomposition
Fumiers	0,15 à 0,45	
Tourbe	1	
Engrais vert jeune	voisin de 0	

Mais pour un type d'apport donné on constate également que les valeurs proposées pour k_1 sont très diverses. S'il est vraisemblable que les conditions dans lesquelles se déroule l'humification influent sur k_1, il semble difficile d'expliquer ainsi la totalité de ces variations. Les erreurs d'appréciation de m, principalement lorsqu'il s'agit de résidus de récolte, et du stock d'humus sont, elles, suffisamment importantes pour expliquer la plupart des divergences.

En particulier le fait de se baser sur les variations de la matière organique totale et non pas sur celles des seules matières organiques liées, conduit à des erreurs particulièrement importantes lorsque la variation du stock humique est faible par rapport à celle du stock de matières labiles.

La séparation des deux formes par fractionnement densimétrique permet de réduire ces erreurs et nous verrons que l'évolution apparemment anormale de la matière organique totale dans certaines situations peut être partiellement expliquée en tenant compte séparément des deux formes de matières organiques.

Il faut toutefois souligner que la fraction organique liée que nous avons globalement assimilée à l'humus biologiquement stable du sol contient également, le plus souvent en faible quantité, des produits transitoires dont nous avons mis en évidence le rôle important sur la stabilité structurale. Le fractionnement densimétrique malgré la très sensible amélioration qu'il a permis d'apporter à l'étude de la dynamique des matières organiques n'a donc pas entièrement résolu le problème et il est bon de garder présent à l'esprit ses limites. Celles-ci sont liées à l'imprécision du concept d'humus.

Quoi qu'il en soit, malgré ces approximations et celles qu'implique l'adoption de toute formule, le schéma que nous venons de présenter a l'avantage d'être en bon accord avec les résultats d'essais de longue durée (MOREL et coll, 1956). De plus, il permet de rendre compte de différentes situations : accumulation dans certains sols des matières organiques libres ou au contraire mobilisation du stock existant

lors d'un drainage ou d'un retournement de prairie, dégradation humique liée à l'adoption de tel système de culture ou de tel assolement ; et ces situations seront celles auxquelles nous devrons faire face lors de l'étude des techniques d'amélioration de la structure et de sa stabilité en liaison avec l'emploi des matières organiques.

CHAPITRE II

LES RÉSIDUS DE RÉCOLTE

Bilan organique et structural des rotations sans fumure organique

Les résidus de récolte sont constitués par la partie du système radiculaire et des organes aériens qui restent à la surface ou à l'intérieur du sol lorsque la récolte proprement dite a été enlevée.

On a cherché à chiffrer pour les principales cultures la masse de matière organique que représentent ces résidus.

Le tableau 17 rassemble quelques unes de ces évaluations.

TABLEAU 17

Résidus de récolte de diverses cultures

Culture	Rendement — Mode de récolte	Masse des résidus exprimée en kg/ha de M.S.
Betterave	45 t/ha	6 000
Pomme de terre		très faible
Maïs	50 q/ha Paille enfouie	5 000
Blé	40 q/ha Récolte à la lieuese	4 000
Orge	40 q/ha Paille enlevée	2 000
Luzerne	2 ans	7 000
Prairie temporaire	3 ans	15 à 18 000

Il ne s'agit évidemment que d'ordres de grandeur. Il est en effet très difficile d'apprécier la masse de la fraction souterraine des résidus. D'autre part, le rendement, et le mode de récolte, entre autres, sont des facteurs importants de variation. Toutefois à partir des données précédentes on peut comparer *les restitutions moyennes annuelles* de quelques rotations (tableau 17 *bis*).

On constate que les différences sont considérables, puisque pour les exemples choisis, qui ne représentent pourtant pas des cas extrêmes, les restitutions moyennes varient presque du simple au triple.

De plus les différentes cultures ne fournissent pas des résidus comparables quant à leur nature et à leur répartition en parties aériennes et souterraines. Ainsi

les 6 000 kg restitués par une culture de betterave le sont essentiellement sous forme de collets et de feuilles laissés en surface. Par contre, dans le cas d'une prairie il s'agit surtout de racines souvent plus lignifiées et déjà intimement mélangées à la masse du sol. Nous verrons lors de l'étude des engrais verts quelles peuvent être les conséquences de ces diverses répartitions sur l'amélioration de la structure du sol.

TABLEAU 17 *bis*

Restitutions moyennes de quelques rotations

Rotation	Restitution moyenne annuelle en kg de M.S./ha
Pomme de terre — blé* — orge*	2 000
Betteraves — blé* — orge* — luzerne (2 ans)	3 800
Maïs ** — blé* — prairie temporaire (2 ans)	5 400

* Paille emportée.
** Paille enfouie.

Nous citerons deux exemples pour illustrer l'importance des résidus de récolte dans le bilan humique et le niveau des propriétés physiques du sol. Le premier concerne les « prises » de la baie de l'Aiguillon en Vendée. Ces terres ont été gagnées sur la mer à différentes époques connues ce qui permet de dater leur évolution. Dans certaines exploitations, toutes les pailles de féverolle et d'orge qui sont les principales cultures sont transformées en fumier qui est vendu à l'extérieur de la région. Les fumures minérales sont faibles. Si l'on compare 2 « prises » ainsi exploitées présentant les mêmes caractéristiques générales, mais dont l'une est cultivée depuis 150 ans de plus que l'autre, on constate dans la première une baisse sensible du taux de matières organiques et de la stabilité structurale :

	S	M. O. p. 100
Prise ancienne	8,2	1,9
Prise récente.....	2,8	3,1

Il s'agit évidemment d'un cas extrême mais qui a l'avantage de montrer *a contrario* de façon particulièrement nette l'importance d'une utilisation judicieuse des résidus de récolte.

Sans être aussi spectaculaire, une évolution comparable a pu être mise en évidence en Champagne en comparant le long d'une limite de remembrement deux parcelles voisines soumises au même assolement mais dont l'une recevait au cours des 20 dernières années une fumure minérale beaucoup plus importante que l'autre et fournissait corrélativement de bien meilleurs rendements.

Les chiffres consignés ci-dessous indiquent que le niveau humique et la stabilité

structurale sont maintenus à un niveau plus élevé dans la parcelle convenablement fertilisée :

	Ag %	S	M. O. %
Zone à forts rendements	12,7	1,05	2,9
Zone à faibles rendements.....	6,9	3,40	2,65

Ce phénomène peut expliquer que dans certains cas l'intensification de la culture, même lorsqu'elle est accomplie aux prix de la suppression de soles dites « améliorantes », conduise à une évolution favorable des propriétés physiques. Il est évident en effet qu'une bonne culture peut produire autant d'effet qu'une mauvaise prairie à faible rendement et enracinement superficiel.

Plus directement l'importance du rôle des résidus de récolte ressort de la comparaison des pertes annuelles de différents sols et des quantités d'humus que peuvent restituer diverses rotations.

Si nous reprenons l'exemple des 3 rotations du tableau 17 *bis* ,en admettant un coefficient isohumique moyen de 0,2 les restitutions humiques peuvent être évaluées comme suit :

Rotation n° 1	400 kg d'humus/ha
Rotation n° 2	760 kg d'humus/ha
Rotation n° 3	1 080 kg d'humus/ha

Les pertes annuelles sont, suivant l'hypothèse que nous avons adoptée, proportionnelles à la quantité d'humus contenue dans la couche arable. Cette quantité sera donc fonction du taux de matière organique et de la masse de terre.

Le tableau 18 souligne les incidences de la quantité de caillous présents dans le

TABLEAU 18

Bilan humique de quelques sols cultivés

Type de sol	Profondeur max. du labour (cm)	Poids de terre fine dans 1 dm³ de sol en place (kg)	Masse de couche arable (t/ha)	M.O. (1) (%)	Stock humus (T/ha)	Pertes annuelles (kg/ha) (2)
(Normandie) Limon blanc	20	1,5	3 000	1,8	54	540
(Région Parisienne) Limon moyen	30	1,6	4 800	2,0	96	960
(Poitou) Rendzine rouge caillouteuse	15	1,1	1 650	4	66	660
(Champagne) Rendzine blanche sur craie.....	20	1,4	2 800	4	112	1 120

(1) Ces teneurs correspondent à un état physique satisfaisant pour les différents cas présentés.
(2) Le coefficient K_2 est supposé égal à 0,01.

sol et de la profondeur maximum des labours pratiqués dans une parcelle, sur le montant du stock humique et corollairement sur les pertes annuelles. Les exemples de calcul qu'il contient et qui correspondent à des cas réels montrent que les évaluations faites à partie d'une masse de terre arable « standard » de 3 000 t/ha ne constituent qu'une première approximation assez grossière qu'il est possible de préciser :

On constate que les pertes sont du même *ordre de grandeur* que les restitutions moyennes des trois rotations-types. Les résidus de récolte sont donc l'élément principal de l'équilibre du bilan humique.

Toutefois des nuances très importantes sont à considérer. Il apparaît par exemple que le sol 4 a besoin d'une rotation de type 3 tandis que la rotation 1 entraînera dans tous les cas un déficit humique. C'est pour combler les déficits résultant d'un déséquilibre entre les pertes et les restitutions de la rotation utilisée sur une exploitation ou pour pallier les inconvénients qui en résultent que l'on fait appel aux différentes techniques que nous allons passer en revue.

Problème particulier de l'enfouissement des pailles

Beaucoup d'agriculteurs, conscients de la nécessité de maintenir un stock humique suffisant dans leur sol, ont pensé qu'il était nécessaire de compenser la suppression des apports de fumier consécutive à l'abandon de la traction animale et de l'élevage, par l'enfouissement de la totalité des pailles de blé ou d'orge qui étaient autrefois restituées après transformations en fumier. Toutefois, cette technique présente de telles difficultés que certains d'entre eux se posent le problème de sa nécessité. Les inconvénients sont de plusieurs sortes. :

Tout d'abord, dans de nombreuses terres, la paille se décompose mal et l'on en retrouve des paquets peu évolués longtemps après l'incorporation.

Ensuite, il y a le problème de la consommation d'azote minéral par les micro-organismes cellulolytiques dont on craint qu'elle ne contrarie la nutrition azotée des cultures ou pour le moins qu'elle ne nécessite des apports supplémentaires.

D'autre part, les pailles abritent fréquemment les formes de maintien de certains parasites et des graines de plantes adventices qui constituent un danger particulièrement dans le cas de cultures céréalières successives.

Enfin, argument souvent implicite, le brûlage des pailles a pu être reconnu ayant à court terme en effet favorable sur la végétation de la culture suivante et les agriculteurs sont tentés de généraliser cette pratique souvent plus facile à réaliser.

Il ne nous appartenait pas d'aborder tous les aspects de ce problème complexe dont certains débordent le cadre de la physique du sol. Nous avons cherché à analyser les phénomènes rattachés à notre discipline qui se produisent dans le sol à la suite d'un enfouissement de paille et à mettre en évidence une évolution générale lorsque ces enfouissements sont répétés. Nous nous sommes basés pour ce travail sur un certain nombre d'essais culturaux et sur des observations isolées.

La constatation de départ est la suivante : lorsqu'une parcelle a subi plusieurs enfouissements de paille, ses propriétés physiques considérées d'une manière générale (facilité de travail, perméalibité aux pluies violentes, etc.) sont dans la grande généralité des cas améliorées. Tout se passe comme si la stabilité structurale du sol

avait été augmentée dans une large proportion. Nous avons donc recherché sur des essais de longue durée à mettre en évidence des différences éventuelles de stabilité entre parcelles ayant ou non reçu des apports de paille.

Les résultats que nous avons obtenus à partir d'un premier essai mis en place par G. BARBIER sur un sol de limon au C. N. R. A. à Versailles et dans lequel sont comparées sur une rotation betterave-blé de printemps en place depuis 1954 trois doses d'azote sans paille avec trois doses d'azote sur paille enfouie (8 tonnes par ha. et par an) sont consignés dans le tableau 19.

TABLEAU 19

Essais « enfouissement de paille 1954 » (Closeaux),
Évolution de la teneur en matière organique et de la stabilité structurale
(Résultats moyens)
Ag_b %

Traitements	Ag_a	Ag_b	S	C ‰ total	C/N total
Sans paille 80 N (1)	4,95	2,60	18,6	11,25	11,6
Sans paille 120 N (5)	5,55	2,70	15,2	12,25	11,45
Sans paille 160 N (6)	4,90	2,55	17,6	12,40	12,0
Avec paille 80 N (2) ...	6,5	3,55	13,1	13,60	12,4
Avec paille 120 N (3) ...	5,55	3,50	14,4	13,75	12,7
Avec paille 160 N (4) ...	5,35	3,25	14,9	13,05	12,2

Il ressort de ces chiffres que, bien qu'elle soit, statistiquement parlant, significative, l'augmentation de stabilité structurale observée à la suite de l'incorporation de pailles de blé, pourtant à des doses annuelles élevées, n'est qu'extrêmement faible. L'indice général S passe en moyenne de 17,1 dans les parcelles-témoin à 14,1 dans les parcelles ayant reçu des apports de paille. Parallèlement, le niveau humique s'est légèrement élevé, passant de 9,05 à 9,5 p. 1 000 de carbone sous forme liée.

On peut conclure de cet essai tout d'abord que le coefficient isohumique K_1 calculé en supposant que les pertes de matières organique par minéralisation de l'humus ont été les mêmes dans les deux cas, apparaît ici comme étant inférieur à 0,1. Cette valeur relativement faible du coefficient isohumique de la paille vient d'ailleurs confirmer d'autres résultats obtenus en particulier par HÉNIN et TURC, SOUBIES et GADET dans la région toulousiane et par MULLER dans la région méditerranéenne.

On peut remarquer également le désaccord profond entre ces résultats obtenus au champ et ceux qui s'étaient dégagés des expériences de laboratoire que nous avons décrites dans la première partie. En effet, dans ces dernières, la fermentation au sein du sol de fragments de paille finement divisés avaient abouti à une augmentation considérable de stabilité principalement due à une diminution de la mouillabilité du sol et ceci pour des augmentations du taux de carbone lié relativement peu importantes. Pour expliquer ce désaccord, plusieurs hypothèses sont possibles : on peut tout d'abord imaginer que la date du prélèvement n'a pas été judicieusement choisie et qu'elle est intervenue à un moment où les produits transitoires de l'humification

avaient disparus. Il ne semble pas, malgré la grosse importance qu'on doit attacher à ce problème, qu'il y ait là une explication satisfaisante. En effet, on trouvera dans le tableau 20 une série de comparaisons relevées dans la région parisienne entre parcelles ayant ou non reçu de la paille et pour lesquelles les prélèvements avaient été effectués à différentes périodes de l'année. Dans aucun de ces cas, on ne trouve de différence plus considérable.

TABLEAU 20

Agb %

Date de prélèvement	Octobre	Octobre	Août	Mars	Mai
Avec paille	1,7	1,2	5,6	3,45	3,6
Sans paille	0,88	1,0	4,4	2,6	3,1

En fait, il semble qu'il faille bien plutôt rendre responsable de cette faible augmentation de stabilité le mauvais mélange de la paille à la couche arable. Dans nos expériences de laboratoire chaque particule de terre se trouvait au contact de particules de paille et les corps microbiens responsables de la transformation ainsi que les produits fixes sur place pouvaient pleinement trouver leur efficacité sur toute la masse de l'échantillon expérimenté. Au contraire, l'enfouissement des pailles aboutit généralement, et c'était vrai dans tous les cas étudiés ici, à localiser la matière organique dans le fond de la couche travaillée. Ceci explique qu'à chaque instant on prive le sol de la stabilisation brutale due aux fermentations pour ne conserver qu'une amélioration très faible due à la légère augmentation du taux d'humus stable peu à peu mélangé au cours des années à l'ensemble de la couche arable par les labours et les diverses façons culturales.

On pouvait d'ailleurs imaginer que cette localisation au fond du labour entraînerait une légère augmentation de stabilité de la couche immédiatement sous-jacente par suite de l'imprégnation de cette dernière par les produits mobiles issus de la fermentation. Le tableau 21 montre qu'il en est effectivement ainsi dans l'essai des Closeaux, bien que, là encore, l'amélioration soit minime et, semble-t-il, sans grande influence sur le comportement du sol.

Il apparaît donc que c'est par un autre mécanisme que celui d'une augmentation

TABLEAU 21

Stabilité de la couche immédiatement sous le fond du labour
(Valeurs moyennes ; Indice 100 = témoin)

Témoin	Paille de blé	Luzerne	Fumier
100	122*	136*	108

* Significativement différent du témoin (P = 0,01).

de stabilité que les enfouissements de paille provoquent l'amélioration à court et moyen terme des propriétés physiques du sol. L'observation comparée de profils avec ou sans incorporation de pailles permet de mettre en évidence la plupart des différents effets annexes dont nous avons parlé au début de ce chapitre.

Tout d'abord, on remarque une pullulation de vers de terre qui, principalement dans les terres de limon où ces animaux semblent se déplacer plus aisément que dans les sols lourds ou sableux, régénèrent tout au long de la période de culture la structure de leurs zones d'action en créant un réseau de galeries facilitant l'infiltration et la circulation de l'eau, le développement des racines en profondeur, l'aération du sol. Ensuite, la présence de lits obliques de paille constitués au travers de la couche arable dans le cas d'un labour relativement dressé, peut permettre un meilleur ressuyage au cours de l'hiver, atténuant ainsi les phénomènes de battance ou de dégradation par les gelées survenant en terre exagérément humide (essais de Gif-sur-Yvette 1960-61).

D'autres observations montrent également certaines conséquences néfastes des localisations de paille au fond du labour. Nous trouvons des phénomènes de gleyfication (essai de Gif-sur-Yvette) ou la formation de couches « barrières » qui s'opposent à la descente des racines dans le sous-sol et aux petits transferts d'eau *per ascensum* dont nous avons parlé plus haut. (Fère-Champenoise).

Il nous reste dans ces conditions à examiner comment améliorer la technique d'enfouissement pour obtenir une meilleure action stabilisante et une diminution des risques d'accident tout en maintenant les aspects bénéfiques que nous avons déjà observés. A partir des considérations ci-dessus, on peut résumer, en les regroupant ainsi, les exigences auxquelles ont doit satisfaire :

— assurer un mélange aussi intime que possible de la paille à l'ensemble de la couche arable ;

— améliorer autant que possible la décomposition de la paille ;

— éviter que le « coup de feu » de la fermentation qui, surtout s'il se produit dans une période où le sol est humide, c'est-à-dire moins bien aéré, est responsable des phénomènes réducteurs, ne se produise alors que la culture suivante est déja installée.

Compte tenu de ces exigences, on peut définir les grandes lignes d'une technique d'enfouissement permettant d'éviter autant que faire se peut, les principaux inconvénients dont nous avons parlé :

Assurer le mélange revient tout d'abord à fragmenter les brins de paille le plus finement possible et à les répartir régulièrement sur toute la surface du champ alors qu'ils ont été laissés à peu près intacts et localisés en andains par la moissonneuse-batteuse. Il existe pour ce faire des machines spécialisées qui sont de plus en plus largement utilisées par les agriculteurs. En ce qui concerne le mélange à la couche arable, il semble que pour l'assurer convenablement, il soit nécessaire de s'y prendre en deux fois : dans un premier temps on commence par mélanger la paille aux 5 à 10 premiers centimètres du sol par un déchaumage profond opéré avec un *cover-crop* ou par un léger pré-labour. Le labour proprement dit devra être aussi dressé que possible de façon à ce qu'une part importante de la couche enrichie en brins de paille, parce que disposée en bandes obliques et non localisée au fond du labour, reste accessible aux dents des instruments de pseudo-labour qui parferont ainsi le mélange lors de la préparation du lit de semence de la culture suivante.

La décomposition est d'ailleurs elle aussi améliorée par le broyage qui brise la couche de cires hydrophobes qui gaine la paille et ralentit son humectation. Le pré-labour qui assure le contact entre la paille et le sol à une époque où la température est encore assez élevée pour autoriser l'activité microbienne est également un facteur d'accélération dans la décomposition de la paille. Cette dernière peut être encore activée par l'installation sur le pré-labour, lorsque les conditions climatiques le permettent, d'une culture dérobée d'engrais verts qui sera incorporée au moment du labour et qui fournira une matière verte très fermentescible apte à jouer le rôle d'un « pied de cuve » pour la décomposition de la paille. Ce perfectionnement, s'il semble très efficace, à condition qu'une dose suffisante d'engrais azoté apportée à l'engrais vert permette d'obtenir une quantité de matière verte suffisante, n'en reste pas moins aléatoire en raison de sa dépendance des conditions météorologiques de l'automne.

La mise en fermentation de la paille immédiatement après la récolte dans des conditions d'aérobiose suffisantes assure déjà l'agriculteur dans une assez large mesure contre les risques d'accident par asphyxie sur la culture qui suivra. De plus, le meilleur mélange ainsi obtenu à la fois par le pré-labour et par un labour dressé atténue encore les risques de gleyfication qui se produisent, nous l'avons vu, principalement lorsque une matière non encore fermentée est enfouie profondément à l'abri de l'air.

En conclusion, il apparaît que si l'incorporation de paille ne présente pas avec les techniques couramment utilisées jusqu'ici d'intérêt immédiat en ce qui concerne l'amélioration de stabilité structurale, elle n'en a pas moins des conséquences évidentes et favorables sur les propriétés physiques du sol considérées dans leur ensemble.

Tout d'abord, les effets annexes d'un enfouissement de pailles semblent, sans même faire intervenir une influence probable sur l'économie de l'azote, justifier à eux seuls une telle pratique à condition que des précautions soient prises pour éviter les accidents de végétation susceptibles de se produire.

Ensuite, si l'on considère le bilan humique dont l'équilibre semble devoir assurer une constante de base à la stabilité structurale, l'incorporation de pailles dans les systémes de culture céréaliers semble seule susceptible de fournir l'appoint nécessaire aux restitutions qui assurent cet équilibre.

Enfin, il ne paraît pas exclu, et des études ultérieures doivent préciser ce point, que le fait d'assurer un meilleur mélange lors de l'enfouissement puisse avoir pour conséquence d'augmenter la stabilité dans des proportions qui, si elles approchaient seulement de celles que nous avons pu noter dans les expériences de laboratoire, aboutiraient à une amélioration considérable. Certes, il s'agirait alors d'une augmentation épisodique dont l'effet ne dépasserait guère une durée de quelques mois et disparaîtrait avec les dernières traces de paille sous forme libre. Toutefois, comme cette action viendrait s'ajouter aux précédentes, elle ferait, semble-t-il, pencher la balance en faveur de l'enfouissement. Il nous faut ajouter que le brûlage pourrait dans cette optique intervenir de temps à autre en tant que mesure sanitaire ou bien dans les cas où les conditions d'exploitation particulières à une année le rendraient intéressant, sans mettre en danger l'avenir de la parcelle puisqu'aussi bien nous avons vu que le manque à gagner du sol en humus consécutif à ce brûlage reste excessivement faible, sinon, pour une seule année pratiquement négligeable.

CHAPITRE III

LES FUMIERS ET AUTRES PRODUITS ORGANIQUES SEMI-FERMENTÉS OU FERMENTÉS

Nous traiterons dans ce chapitre de tout un ensemble de matières organiques plus ou moins couramment utilisées mais qui ont ceci de commun de n'être pas des substances « fraîches », ce qualificatif étant pris dans le sens où nous l'avons utilisé jusqu'à présent c'est-à-dire désignant des produits non fermentés. On trouvera dans ce groupe d'amendements organiques outre le produit le plus important, le fumier, des produits divers : résidus humiques industriels, tourbe, engrais organiques divers.

I. Les fumiers

Il s'agit là traditionnellement de l'amendement organique par excellence : celui auquel on pense en premier lieu dès que l'on évoque le maintien du niveau humique des sols et plus généralement le maintien de la fertilité. En fait, la dénomination de fumier recouvre tout en ensemble de matériaux organiques divers en ce qui concerne leur origine et leur degré d'évolution. C'est ainsi qu'on distingue les fumiers suivant leur origine : fumiers de bovins, de chevaux, de moutons, pour ne citer que les principaux ; et aussi leur état, lequel est fonction à la fois de la proportion de résidus végétaux qui en constituent le support et du stade de décomposition auquel l'ensemble paille + déjection animale est parvenu. On parle ainsi de fumier pailleux de fumier bien fait, de fumier sec, de fumier gras, etc.

On conçoit qu'il soit difficile dans ces conditions de présenter un mode d'action du fumier alors qu'en fait il ne peut y avoir qu'une série de variantes dépendant de la nature du fumier.

a) *Évolution du fumier dans le sol*

Au cours de sa fabrication, le mélange de la litière et des déjections a déjà subi un certain nombre de transformations fermentatives allant jusqu'à la formation d'acides humiques.

L'intensité de ces fermentations se manifeste d'ailleurs par l'élévation de température qui se produit au sein d'un tas de fumier. Ce dernier représente donc un produit concentré et déjà plus ou moins évolué.

Ces caractéristiques ont chacune leur conséquence pratique :

— La fermentation « explosive » qui a lieu lorsque les conditions de milieu le permettent peu de temps après l'incorporation au sol d'une matière fermentescible est d'autant plus faible que le fumier est plus décomposé. Il s'ensuit que les risques d'accidents par apparition de conditions réductrices dans le sol varient selon la qualité du fumier mais sont moins importants que lors d'enfouissement de matières « fraîches ».

— D'autre part le rendement de la transformation en humus dans le sol, c'est-à-dire le coefficient isohumique K_1 est plus élevé que dans le cas de matériaux non fermentés. Il a été chiffré à des valeurs allant de 0,15 à plus de 0,50 suivant les auteurs et le type de fumier étudié. La conséquence de ce meilleur rendement sur le niveau humique du sol doit cependant être précisé par rapport à l'action d'un apport de paille.

En effet on peut considérer que pour des *apports égaux* de matière sèche la fourniture d'humus est proportionnelle au coefficient isohumique. Dans ces conditions le fumier fournira 2 à 5 fois plus d'humus que la même quantité de paille. Par contre il en va différemment si l'on compare comme nous le verrons plus loin, un apport de paille donné à la même quantité de paille préalablement transformée en fumier artificiel on peut alors parler d'apports non plus *égaux* mais *équivalents*.

L'apport humique H_p de la paille reste si Q est la quantité apportée et K_{1p} le coefficient isohumique de la paille.

$$H_p = K_{1p} \times Q$$

L'apport humique du fumier, lui, est égal à :

$$H_f = K_{1f} \times f \times Q$$

où K_{1f} est le coefficient isohumique du fumier en question et f le rendement en matière sèche de la transformation de paille en fumier.

Le rapport $\frac{H_f}{H_p}$ n'est plus égal à $\frac{K_{1f}}{K_{1p}}$ mais à $\frac{K_{1f \times f}}{K_{1p}}$.

Par exemple, dans l'essai des Closeaux dont nous avons parlé page 95 certaines parcelles avaient reçu un fumier pailleux pour lequel $f = 0.5$. K_{1f} devrait donc être au moins égal à 2 K_{1p} pour qu'à quantités *équivalentes* le fumier fournisse plus d'humus que la paille.

b) *Action sur la stabilité structurale*

Si l'on compare, comme dans le tableau 22 l'amélioration de stabilité provoquée par apport de fumier dans les 20 centimètres superficiels d'un sol de limon avec celle qu'on peut déceler dans la couche homologue d'un sol comparable après 3 ans de prairie temporaire (ray-grass anglais), on constate une différence fondamentale. Tout d'abord, l'augmentation de stabilité, qui est de 115 p. 100 par rapport au témoin non fumé à la suite d'apports annuels de 100 tonnes de fumier à l'ha pendant 25 ans, est de 200 p. 100 après 3 ans de repos sous prairie temporaire. D'autre part, ces augmentations de stabilité ne sont en aucun cas en rapport avec les accroissements qui leur correspondent du taux de matière organique du sol. Ceux-ci, très importants à la suite des apports de fumier, sont relativement faibles sous prairie. Il s'agit donc de deux formes de matières organiques ayant des activités spécifiques extrêmement

différentes. Enfin, nous avons vu dans la première partie de ce mémoire, (p. 388), que si l'on soumettait un échantillon amélioré par 3 ans de prairie temporaire à une fermentation au laboratoire dans des conditions standard, 50 p. 100 de l'amélioration disparaissait au bout d'un mois tandis que dans le cas d'une terre améliorée par des apports de fumier, seulement 20 p. 100 de l'amélioration disparaissait dans les mêmes conditions.

TABLEAU 22

Traitement	100 t fumier/ha/an			Repos sous prairie temporaire 3 ans		
	Parcelle fumée	Témoin	Augmentation % du témoin	Parcelle en prairie	Témoin	Augmentation % du témoin
Ag$_b$ %	11,0	5,1	115	5,1	1,7	200
M.O. totales	4,34	1,74	150	1,65	142	16

A partir de cet ensemble de faits, on peut élaborer un schéma représentant le mode d'action du fumier sur la stabilité structurale.

Les améliorations observées seraient dues essentiellement à une élévation du taux de matières humiques stables. Ces dernières, en effet se forment en quantité relativement importantes, nous l'avons vu, au cours de la décomposition du fumier dans le sol ; mais leur activité spécifique est faible, si on le compare à celle des produits transitoires de l'humification. L'exemple précédent le montre et nous avons déjà obtenu des résultats analogues en comparant au laboratoire l'activité d'acides humique à celle d'autres substances organiques. Ces produits transitoires ne représentent pas un apport important dans le cas du fumier pour deux raisons principales :

— d'abord parce qu'une grande partie d'entre eux s'est formée puis a disparu au cours de la fabrication du fumier, c'est-à-dire hors du sol.

TABLEAU 23

Essai des Closeaux (dispositif 1949)

Parcelles	Ag$_a$ %	Ag$_b$ %	S	C $^0/_{00}$ total
sans fumure org.	5,15	3,1	10,8	11,7
avec Fumier	6,9	4,2	8,15	13,7

— ensuite, comme dans le cas des pailles, le mauvais mélange du fumier résultant des enfouissements couramment pratiqués ne permet pas aux produits « jeunes » qui se forment encore dans le sol de se fixer sur une masse de terre suffisante pour que leur action se manifeste.

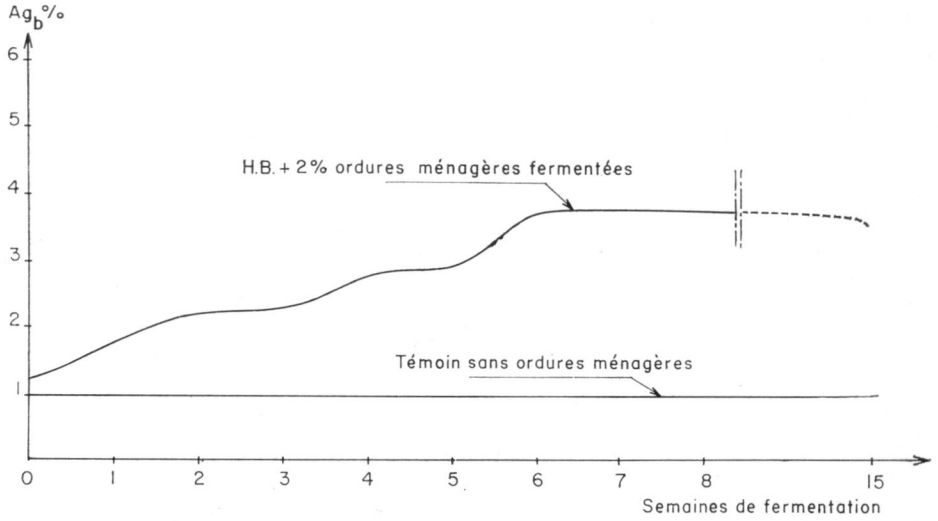
Une confirmation de ce point de vue nous est fournie par le comportement comparé des parcelles ayant reçu du fumier et de la paille dans le dispositif expérimental des Closeaux.

On constate que l'augmentation de stabilité de même que l'augmentation du taux de matière organique sont du même ordre de grandeur que dans le cas d'un apport de paille. L'équivalence dans la variation du taux d'humus peut s'expliquer par le fait que la quantité de fumier apporté a été calculée de façon à assurer l'équivalence des matières fraîches de départ (voir p. 491).

Quant à l'action sur la stabilité structurale, elle n'est donc ni plus ni moins importante que lors de l'enfouissement d'une paille et la faveur que connaît le fumier auprès des agriculteurs ne semble pas devoir être rattachée à une amélioration de stabilité seule mais plutôt à un ensemble d'avantages : participation à la fertilisation azotée et minérale, faibles risques d'accidents culturaux, facilité technologique de l'enfouissement, auxquelles s'ajoute bien entendu l'action sur la faune du sol commune à l'incorporation de tous les amendements organiques.

II. Engrais organiques divers, tourbe, etc.

Les engrais organiques présentés dans le commerce peuvent être rattachés à deux grandes catégories : la première comprend les produits à base de tourbe plus ou moins enrichis en germes microbiens, tandis que la deuxième correspond à des matériaux directement comparables à des fumiers artificiels : c'est le cas des amendements à base d'ordures ménagères fermentées.



GRAPHIQUE 24. — *Évolution au cours du temps de la stabilité d'un sol ayant reçu un compost d'ordures ménagères*

Dans le cas des tourbes ou des amendements à base de tourbe il s'agit le plus souvent de produits déjà très humifiés, qui ne subissent qu'une évolution très lente après leur enfouissement, se fixent difficilement aux particules terreuses. Leur efficacité déjà relativement faible comme celle des produits évolués en général s'en trouve encore réduite. Dans ces conditions, l'amélioration de la stabilité par leur intermédiaire nécessiterait des doses d'amendement considérables et l'on ne peut que poser la question de la rentabilité de l'opération.

En ce qui concerne les ordures ménagères fermentées un essai de laboratoire suivant les modalités de l'essai « durée de fermentation » à partir de farine de foin de luzerne (voir p. 366) a montré que leur évolution reflétée par leur liaison à la partie minérale du sol est très lente. Parallèlement la stabilité structurale croît régulièrement bien que faiblement (graph. 24) sans que l'on puisse noter le phénomène de stabilisation intense qui se produit dans le cas d'un apport de matière fermentescible.

Il semble donc qu'on puisse assimiler ces produits à des fumiers pour ce qui est de leur action sur la stabilité de la structure. Encore faut-il tenir compte des variations saisonnières intervenant dans leur qualité et dont l'amplitude est reconnue comme importante (BARBIER et KEILING [1]).

En conclusion commune à ce que nous avons vu de l'action des produits étudiés dans ce paragraphe, nous soulignerons l'intérêt qu'il y a à ne pas confondre rendement humique élevé et action stabilisatrice intense. Les deux aspects ont leur intérêt propre. le premier à long terme, et le deuxième en ce qui concerne une valeur-précedent immédiate.

L'intérêt d'un système mixte agriculture-élevage est de combiner l'action du fumier particulièrement intéressante en ce qui concerne le maintien à long terme du taux d'humus et des propriétés structurales de base qui en dépendent et celle des prairies dont nous examinerons plus loin l'influence sur les propriétés physiques du sol.

(1) *Techniques agricoles*. Éditions techniques, Paris.

CHAPITRE IV

LES ENGRAIS VERTS

Ce sont des cultures installées dans le but de fournir de la matière végétale qui sera enfouie dans le sol. Les mécanismes invoqués pour expliquer les variations de rendements qui peuvent résulter de l'application de cette pratique sont divers : enrichissement en humus, protection du sol, activation de la vie microbienne, action sur la dynamique des éléments fertilisants, etc.

En fait les essais culturaux, s'ils permettent d'évaluer les effets sur la récolte, sont rarement conçus de façon à mettre en évidence l'importance du ou des divers facteurs de la fertilité qui ont été modifiés au cours de la culture de l'engrais vert ou après son enfouissement. Nous retrouvons donc la nécessité d'envisager l'ensemble des processus qui peuvent être déclenchés par l'introduction d'une culture d'engrais vert et de mettre en évidence leurs conséquences parfois opposées. C'est seulement après ce travail d'analyse et d'explication qu'il sera possible d'interpréter certains résultats culturaux contradictoires et d'énoncer des règles générales. Notre but est de contribuer à la compréhension des mécanismes d'action des engrais verts sur les propriétés physiques du sol et particulièrement sur la stabilité structurale.

I. Différents types d'engrais verts

Une des raisons de la variabilité des résultats nous paraît être la grande diversité des actions effectivement pratiquées. Ces différences se situent d'ailleurs à plusieurs niveaux :

a) *La place de l'engrais vert dans la rotation*

On peut en effet distinguer les engrais verts en « culture dérobée », c'est-à-dire dont la végétation prend place entre deux cultures, à une période où, normalement, le sol resterait nu ; les engrais verts « assolés », c'est-à-dire ceux se substituant à une culture intervenant ainsi à part entière dans l'assolement ; enfin les engrais verts en culture « associée » par exemple ceux qui occupent pendant une partie de l'année le sol d'un verger.

b) *L'espèce végétale cultivée*

Les engrais verts appartiennent généralement à l'une des trois familles suivantes : Légumineuses, Graminés, Crucifères. Ces familles se distinguent par la masse et la qualité de la matière végétale produite, en particulier par la répartition du poids

total du végétal entre les fractions aériennes et souterraines et aussi à un tout autre point de vue par le coût de l'installation (prix de la semence) qui est sensiblement plus élevé pour les Légumineuses.

c) *Le stade végétatif*

L'engrais vert au moment de son enfouissement, et plus particulièrement son degré de lignification, sont importants à considérer, car ils déterminent dans une large mesure l'évolution et le rendement en humus de la matière végétale dans le sol.

La plupart de ces caractéristiques paraissent susceptibles d'influer, directement ou non, sur les modalités ou l'intensité de l'action des engrais verts sur les propriétés physiques du sol. Elles constituent donc des éléments de base du problème posé.

La quantité de matière végétale dont l'importance est évidente varie suivant l'espèce, les conditions climatiques, la fertilisation et la durée de végétation de la culture. Dans le cas, le plus fréquent en grande culture, d'un engrais vert en « dérobée » où la durée de végétation n'est que de quelques semaines (fin de l'été, début de l'automne) ce sont principalement la pluviométrie et la fertilisation qui déterminent le tonnage de matière végétale produite.

Un deuxième point concerne les qualités de cette matière. La proportion entre les parties aériennes (tiges et feuilles) et les parties souterraines (racines) est essentiellement fonction de la famille et de l'espèce botanique. Mais le rendement de a culture peut le modifier (tabl. 24).

TABLEAU 24

Masse végétale fournie par divers engrais verts, Répartition en fractions aériennes et souterraines
(Tonnes/ha)

Type d'engrais vert	Parties aériennes	Racines	Total
Graminées			
Ray-Grass Italien (1)	2,5	9,5	12
Légumineuses			
Vesce (1)	5,3	3,8	9,1
Trèfle incarnat (1)	6,8	3,5	10,3
Pois d'hiver (1)	4,5	2,8	7,3
Crucifères			
Siletta	2,95	2,6	5,55
Colza *Liho* (faible rendement)	4,4	4,2	8,6
Colza *Liho* (fort rendement)	10,1	4,3	14,4

(1) D'après MAC VICKAR et *al.* (1960).

D'autre part le degré de lignification est lui fonction de l'espèce et du stade végétatif auquel a lieu l'enfouissement. Ce dernier est le résultat du jeu de plusieurs facteurs tels que le climat de l'année, la nature des cultures qui précédent et suivent l'engrais vert et aussi de la décision de l'agriculteur.

II. Les différents modes d'action des engrais verts sur la structure du sol et sa stabilité

Une première caractéristique générale de la masse végétale fournie par la culture des engrais verts est sa rapidité de fermentation. On constate couramment que quelques semaines après enfouissement d'une végétation jeune toute trace des parties aériennes a disparu. Il arrive par contre qu'on puisse retrouver des débris de racines lorsque celles-ci étaient très abondantes comme c'est le cas par exemple pour une Graminée telle que le Ray-grass d'Italie.

Cette vitesse de décomposition implique qu'il se soit produit dans le sol une fermentation de caractère explosif comparable à celle que nous avons observée au laboratoire au cours de nos expérimentations à partir de glucose. Cette tendance générale est, bien entendu, plus ou moins accusée, selon la qualité de la matière végétale considérée.

Quant au coefficient isohumique, c'est-à-dire au rendement en humus des matériaux envisagés, il est lui aussi fonction des caractéristiques de la matière végétale. On sait, après les travaux de divers auteurs (BREMNER, FLAIG, FORSYTH) que les acides humiques et l'humus sont caractérisés par la présence de composés contenant des noyaux benzéniques et certaines chaînes latérales tels qu'en fournissent les résidus d'attaque des lignines. Corollairement, certains auteurs ont montré qu'un enfouissement d'engrais vert n'augmentait pas sensiblement le taux d'humus du sol et pouvait même accroître la vitesse de destruction de l'humus. Le tableau 25, établi d'après des données de BRADT, indique qu'en sol de verger et pour une période de 10 ans les variations du taux de matière organique totale du sol restent négligeables

TABLEAU 25

Variation du taux de matière organique de la couche arable d'un sol de verger après 10 ans de culture d'engrais vert
(D'après BRADT)

Nature de l'engrais vert	Variation du taux de matières organiques %
Sarrazin	
1 culture par an.....	— 0,1
2 cultures par an	— 0,1
Seigle — Soja	+ 0,1
Seigle — Trèfle	+ 0,2

Il semble que d'une façon générale on puisse admettre que les coefficients isohumiques seront d'autant plus faibles que l'engrais vert sera plus jeune et donc moins lignifié et que la masse des racines sera plus faible par rapport à la masse végétale totale.

Le faible rendement en humus de la transformation exclut la possibilité d'une amélioration sensible de stabilité provenant d'un relèvement du taux d'humus du sol. D'ailleurs ,dans le cas de cultures dérobées, il n'a jamais été possible, à notre connaissance, de déceler un changement quelconque *d'une année sur l'autre* de la stabilité structurale.

Par contre il est très probable, bien que cela n'ait pas été montré de façon irréfutable, qu'il existe pendant une courte période après l'enfouissement une stabilisation assez éphémère, et ne portant que sur les particules terreuses au contact direct des matières végétales en décomposition. Ce caractère localisé dans le temps et dans l'espace de l'amélioration correspond au développement d'une microflore abondante visible directement dans le sol, à certaines époques, comme c'était le cas dans les fermentations de laboratoire à partir de glucose. Il explique la difficulté que l'on rencontre lorsqu'on veut mettre en évidence au champ ce phénomène. Il faut souligner de plus que dans les conditions naturelles le facteur « temps » devient très relatif et devrait être pondéré à l'aide d'un coefficient indiquant pour chaque période au moins la température et l'humidité moyenne du sol.

Nous avons présenté cette hypothèse sur le mode d'action des engrais verts en nous référant à un modèle de laboratoire mais aussi en nous appuyant sur le comportement du sol au champ. Deux observations viennent le confirmer.

D'abord, BENOIT et *al.* (1962) ont constaté que pour un enfouissement d'engrais vert effectué en avril l'augmentation de stabilité structurale évaluée par une méthode différente de celle que nous avons utilisée, était très sensible au mois de mai et avait presque entièrement disparue au mois de septembre (tabl. 26).

TABLEAU 26

Stabilité des agrégats (exprimée en valeur indexée sur un témoin sans engrais vert) après enfouissement d'un seigle au mois d'avril
(D'après BENOIT et *al.* 1962)

Date de prélèvement	Mai	Septembre
Témoin	100	100
Engrais vert total	161	119
Racines seulement (parties aériennes exportées) (1)	150	116

(1) On notera l'importance du rôle de la fraction souterraine de la plante.

La deuxième observation est due à KONONOVA et BELCHIKOVA qui ont noté l'importance du délai écoulé entre l'enfouissement d'un engrais vert et l'installation de la culture suivante.

Enfin il existe en dehors de ces influences fugaces sur la stabilité d'autres modalité d'intervention des engrais vert directement sur la structure.

Nous retrouvons ici la plupart des actions déjà mentionnées dans le cas des enfouissements de paille. La faune du sol, les vers de terre en particulier (tabl. 27) prolifèrent et accroissent la porosité du sol.

TABLEAU 27

Action des engrais verts sur la prolifération des vers de terre
(D'après J. VAN RHEE et *al.* 1961)

	Nombre de vers au mètre carré
Sol nu	30
Engrais vert	100
Gazon	400

D'autre part, dans le cas de plantes à tige rigide ou très riches en racines, la matière enfouie constitue une armature provisoire interne du sol soutenant à bout de bras si l'on peut dire la structure. Enfin, au cours de la végétation, les espèces couvrantes atténuent l'action des gouttes d'eau et constituent donc sinon un correctif, du moins un palliatif à une stabilité insuffisante.

Nous citerons pour terminer un exemple cultural montrant que les engrais verts ont une action d'autant plus forte sur le rendement que le niveau humique et structural du sol est plus faible. Le tableau ci-dessous rassemble les résultats moyens d'un essai sur orge de printemps mis en place sur deux parcelles voisines de Champagne défrichées depuis des temps différents :

TABLEAU 28

Influence de l'enfouissement d'un colza Liho *sur le rendement d'une culture d'orge*

	Matière organique %	$\log_{10}$ 10 S	Rendement de l'orge en quintaux par ha	
			après engrais vert	Témoin
Parcelle défrichée depuis 4 ans	5,3	0,93	58,5	54,8
Parcelle défrichée depuis 10 ans	4,2	1,20	50	43,2

Si l'on se réfère aux expériences décrites dans la première partie de ce mémoire, concernant la mise en œuvre de substances aisément fermentes cibles, on peut s'attendre à ce que les engrais verts constitués généralement par des tissus jeunes donc pauvres en lignine et riches en azote exercent un effet comparable. En d'autres termes ils provoqueront sur la stabilité structurale un effet fugace dont l'intensité sera liée à la masse végétale enfouie, à sa répartition dans le sol et aux conditions de fermen-

tation (température, humidité, aération du milieu) au moment de l'enfouissement.

En ce qui concerne l'effet agronomique global, les fermentations intenses qu'ils peuvent produire, la porosité supplémentaire qui résulte de leur enfouissement peuvent expliquer leur influence favorable. Leur action d'activation sur la décomposition des pailles peut également être bénéfique. Par contre, dans les sols à mauvaise structure ils peuvent favoriser l'apparition de phénomènes réducteurs qui se manifestent par la formation de gley.

Dans les conditions de structure plus favorables ils semblent soit diminuer la valeur des coefficients K_1 isohumiques soit même augmenter le cœfficient K_2 de destruction de l'humus. Leur enfouissement répété risque ainsi d'aboutir à un abaissement de la réserve organique du sol.

En dépit de son action favorable évidente dans certains cas, l'engrais vert doit être considéré comme une technique d'utilisation délicate aux effets incertains tant que ses conditions d'applications n'auront pas été précisées.

CHAPITRE V

REPOS DU SOL SOUS UNE VÉGÉTATION PERMANENTE

De nombreuses agricultures se fondent encore sur le système de la jachère [1] le mot étant employé ici dans son sens le plus général. Ce système correspond à un assolement comprenant une part plus ou moins importante des terres cultivables abandonnées au repos, une ou plusieurs années, avant d'être remises en culture. Les raisons de l'augmentation de fertilité consécutive à une jachère sont parfois autres que celles qui pourraient justifier leur place dans cette étude. Nous nous en tiendrons aux pratiques visant à assurer et à utiliser la reconstitution de la fertilité du sol sous une végétation permanente. Dans certains cas, en particulier lors de la mise en valeur de régions non cultivées, le problème reviendra à examiner l'évolution des propriétés physiques du sol consécutive au défrichement. Ce problème ne présente d'intérêt général que dans les pays tropicaux d'agriculture itinérante où l'assolement consiste en une certaine répartition entre la surface cultivée et la brousse secondaire ; il se pose plus rarement en région tempérée. Par contre, il existe, pour les assolements les plus intensifs actuellement pratiqués dans certains systèmes de cultures, une surface réservée à des cultures pluri-annuelles fourragères qui jouent le rôle des jachères de la culture extensive.

Après avoir examiné rapidement un exemple d'évolution du sol après défrichement forestier, nous nous attacherons à étudier plus longuement le mécanisme de l'amélioration structurale des sols sous prairie temporaire assolée. Nous aurons en fait à examiner quels sont les facteurs qui permettent ou qui limitent les bénéfices que l'on peut retirer d'un système de culture qui tend à se développer dans les régions à système mixte mais intensif d'agriculture et d'élevage, système généralement désigné sous le terme anglo-saxon de « *ley-farming* » [2].

Évolution du sol consécutive à des défrichements

Nous prendrons pour exemple d'une telle évolution celle qui a affecté les sols de la Champagne crayeuse mis en culture après défrichement des forêts de pins noirs. Cette évolution se manifeste par le fait qu'au fur et à mesure que ces terres « vieillissent » c'est-à-dire qu'il s'est écoulé plus d'années depuis leur mise en culture, il apparaît dans leur conduite une certain nombre de difficultés qui découlent d'une lente dégradation de leurs propriétés physiques. Nous avons regroupé dans le ta-

(1) On appelle jachère un terrain ne portant pas de plantes donnant lieu à exploitation. Il peut être maintenu nu par des façons aratoires ; on peut au contraire le laisser se recouvrir d'une végétation naturelle.

(2) Il s'agit uniquement là de la reprise de rotations classiques traditionnellement utilisées dans certaines régions françaises (Ardennes, Centre-Est, etc.)

bleau 29 les résultats concernant les deux tests de stabilité structurale (analyse d'agrégats et perméabilité) se rapportant à différentes parcelles défrichées depuis des laps de temps variables. Dans tous les cas, il s'agit de sols appartenant au groupe des rendzines grises ou blanches caractérisées par la présence d'une teneur extrêmement élevée en calcaire (60 à 80 p. 100) presque entièrement réparti entre les fractions granulométriques correspondant au limon et aux sables grossiers. On constate une nette évolution dans un sens défavorable : après 15 ans de culture les sols passent d'une classe à très bonne stabilité à une classe inférieure qui, tout en conservant des propriétés structurales moyennes, commence à poser certains problèmes culturaux. L'explication d'une telle dégradation semble essentiellement liée à la diminution du taux de matières organiques contenu dans le sol.

TABLEAU 29

Evolution des sols après défrichement en Champagne

Désignation des sols		Matière organique totale %	Matière organique liée %	Stabilité structurale (moyenne)	
				log 10 S	log 10 K
	1re catégorie				
Terres défrichées depuis moins de 15 ans	n° 1	5,1	4,82		
	n° 2	6,7			
	n° 3	4,7			
	n° 4	4,0			
	Moyenne	5,12		0,71	2,21
	2e catégorie				
Terres défrichées depuis plus de 15 ans et moins de 50 ans	n° 5	3,7	3,15		
	n° 6	3,75			
	n° 7	3,65			
	Moyenne	3,7		0,88	2,01
	3e catégorie				
Terres défrichées depuis plus de 50 ans	n° 8	3,3	2,38		
	n° 9	2,6			
	n° 10	2,8			
	n° 11	3,0			
	Moyenne	2,91		1,13	1,65

En fait, il est à peu près obligatoire que le stock très important de matière organique accumulée sous la forêt de pins en raison de conditions correspondant à un coefficient α extrêmement faible, subisse une diminution sensible après modification de ces conditions par le travail de défrichement et les conditions de la culture

en raison de la destruction de la fraction libre. Le problème qui se pose est celui de se maintenir à un niveau suffisamment élevé pour conserver des propriétés structurales convenables. Un exemple de calcul peut fournir un ordre de grandeur des restitutions théoriquement nécessaires pour maintenir le taux de matière organique à un niveau voisin de 4 p. 100. Il s'avère en effet que cette teneur représente la limite en deçà de laquelle des difficultés culturales commencent, Parmi les éléments du calcul, on doit faire intervenir la profondeur du sol qui n'excède généralement pas une quinzaine de cm en moyenne, ce qui représente, compte tenu de la présence de 20 p. 100 environ d'éléments grossiers (cailloux calcaires) un tonnage de terre fine équivalent à 2 000 tonnes/ha. soit pour le niveau critique 80 tonnes d'humus. Si l'on admet un coefficient k_2 de minéralisation de ce dernier égal à 1,5 p. 100 c'est une quantité annuelle de 1 200 kg d'humus qu'il sera nécessaire de restituer. Il est douteux, nous l'avons vu (voir p. 484), que les seuls résidus de récolte puissent participer pour plus de 5 à 600 kg à cette restitution. Aussi semble-t-il nécessaire de recourir à un assolement faisant intervenir une sole de repos sous prairie temporaire. Il semble bien d'ailleurs que dans les exploitation où l'on s'est orienté vers une solution de ce type, les problèmes dus à de mauvaises propriétés physiques voient leur apparition retardée.

Si les conditions économiques ne permettent pas l'adoption d'un système mixte agriculture-élevage, il faut trouver des palliatifs tels qu'une incorporation systématique des pailles et d'engrais verts et l'utilisation de méthodes de travail du sol adaptées aux terres à stabilité structurale insuffisante.

Influence du repos sous prairie sur les propriétés physiques du sol

La méthode la plus évidente pour apprécier la valeur d'une période de repos sous prairie en tant que précédent cultural consiste à comparer les rendements de cultures installées respectivement sur défriche de prairie et sur des parcelles voisines en culture continue depuis de nombreuses années. Différents auteurs ont présenté des résultats de cet ordre intéressant la culture de défriche ainsi que la deuxième et la troisième culture suivantes. Nous citerons un exemple proposé par des chercheurs anglais en soulignant que l'essai en question est très orienté au départ: les cultures n'y reçoivent en effet pas d'azote, ce qui laisse supposer que pour ces expérimentateurs, le bénéfice principal d'une augmentation de la matière organique du sol telle qu'elle apparaît en particulier sous prairie devait être *a priori* d'augmenter le stock d'azote disponible La nutrition azotée devient dans de tels essais le facteur limitant du rendement et les auteurs constatent, ce qui paraît très logique, que ce dernier est en corrélation étroite avec la quantité d'azote minéralisable présente dans le sol au moment du retournement. Le tableau suivant 30 présente les rendements de trois récoltes successives : blé, chou et orge, obtenus soit sur terre de vieille culture, soit sur précédent-prairie.

On constate tout d'abord qu'il existe une arrière-action favorable de la prairie qui dans le cas présent peut se chiffrer à 6 quintaux de céréales par ha environ ou à 4 tonnes de choux ; cet arrière-effet se prolonge dans le cas présent au moins trois ans. D'autre part il est intéressant de noter qu'un apport supplémentaire de 30 unités d'azote sur la troisième année de culture : l'orge, augmente d'une dizaine de quintaux

les rendements moyens mais n'atténue pas la différence de rendement en fonction du précédent. Il apparaît donc que ce dernier agit autrement que comme une simple source d'azote.

De nombreux autres résultats, que nous ne citerons pas dans le détail, vont dans le même sens. Toutefois en France certaines observations, non chiffrées il est vrai, sont contradictoires, certaines prairies temporaires passant pour être de mauvais précédents culturaux. En fait, trop de facteurs interviennent pour que le seul résultat global d'une variation du rendement, qu'elle soit en plus ou en moins, ait une valeur généralisable. Il convient d'abord de faire l'inventaire des répercussions d'une prairie sur le sol. Nous nous bornerons ici aux aspects se rattachant aux propriétés physiques du sol et principalement à l'enrichissement en matière organique et aux modifications de stabilité structurale.

TABLEAU 30

Exemple d'augmentation de rendement sur retournement de prairie temporaire

Précédent	Rendement
Première récolte : blé	
Vieille culture rotation cultivée de 4 ans	39,4 q/ha
Précédent prairie (moyenne générale) espèces traitements	44,6 q/ha
Deuxième récolte : choux	
Vieille culture	38,9 t/ha
Blé sur prairie	43 t/ha
Troisième récolte : orge	
Vieille culture (6 ans)	33,5 q/ha
Augmentation par apport de 30 kg/N/ha	10,2 q/ha
Précédent prairie	39 q/ha
Augmentation par apport de 30 kg/N/ha	9,7 q/ha

I. — Mécanisme de l'amélioration structurale

Enrichissement en matières organiques

Le tableau 31 présente les teneurs en matières organiques totales d'échantillons représentant les 25 cm superficiels de sols cultivés et de sols de prairie situés à proximité immédiate.

On constate que les sols de prairies contiennent des quantités sensiblement plus importantes que les sols cultivés et cela d'autant plus que la prairie est plus ancienne.

Une première explication de ce phénomène peut être fournie en supposant qu'en l'absence de tout travail du sol la minéralisation de l'humus est extrêmement lente sous prairie. Toutefois cette raison ne peut être suffisante. En effet dans le cas de la prairie de 3 ans de l'Eure du tableau 31 ci-dessus, la terre comporte 0,35 p. 100 de matières organiques totales de plus que sous culture. Si nous supposons que le coef-

ficient K_2 est nul sous prairie pendant les 3 ans et de 0,03 sous culture, ce qui représente une hypothèse extrême, nous n'expliquons ainsi que le 1/4 de la différence constatée. La conclusion est la même dans le cas des comparaisons de la Manche ou de La Minière.

TABLEAU 31

Comparaison des teneurs en matières organiques totales de la couche arable de sols cultivés et de sols sous prairie

Origine	Matières organiques totales %		
	Sols cultivés	Prairie de 3 ans	Praries de plus de 15 ans
Eure	1,3	1,65	3,78
Manche	1,42	1,42	4,26
Seine-et-Oise	1,33	1,89	

Si maintenant, au lieu de considérer la teneur moyenne en matières organiques des 25 cm. superficiels, nous examinons séparément les couches successives du sol de 5 cm d'épaisseur, nous constatons (tabl. 32) que cette différence est surtout sensible dans les couches superficielles qui renferment une quantité importante de racines alors qu'elle devient négligeable au-dessous de 10 à 15 cm de profondeur dans le cas étudié.

TABLEAU 32

Comparaison des teneurs en matières organiques totales dans les couches superficielles du sol sous prairies temporaire de 3 ans et sous culture

(Bernay)

Profondeur (cm)	Prairie N° 1	Prairie N° 2	Prairie N° 3	Témoin cultivé
0-5	1,50	1,95	2,20	1,35
5-10	1,40	1,35	1,50	1,30
10-15	1,35	1,35	1,40	1,35
15-20	1,25	1,25	1,30	1,25
20-25	1,30	1,25	1,25	1,30

Il apparaît donc beaucoup plus probable que l'enrichissement en matières organiques sous prairie est dû pour sa plus grande part aux apports constitués par les racines où leurs produits de décomposition. Dans le but de préciser l'allure de ce phénomène, nous avons cherché à étudier séparément les matières organiques libres et les matières organiques liées.

Le tableau 33 ci-dessous indique quelle est, couche par couche, la répartition de ces deux formes dans un sol sous Ray-grass anglais et dans un sol sous Dactyle, les deux prairies étant installées depuis 3 ans.

TABLEAU 33

Enrichissement en matières organiques libres et liées des couches superficielles du sol sous deux types de prairies temporaires de 3 ans

Prairie	Profondeur (cm)	Matières organiques totales (C °/oo)	Matières organiques libres			Matières organiques liées			Δ C lié / Δ C libre
			C °/oo	C/N	Δ C °/oo libre (*)	C °/oo	C/N	Δ C °/oo lié (*)	
Ray grass anglais	0-5	20,0	1,74	20	1,22	18,2	11,5	3,3	2,7
	5-10	17,5	1,08	21,7	0,56	16,4	11,0	1,5	2,6
	10-15	16,6	0,88	28,5	0,36	15,5	11,0	0,8	2,2
	15-20	16,2	0,72	30	0,20	15,5	11,0	0,6	3,0
	20-25	15,4	0,67	32,5	0,15	14,7	10,0	— 0,2	—
Dactyle pelotonné	0-5	18,6	1,47	23,2	0,95	17,1	10,6	2,2	2,3
	5-10	16,5	1,08	24,0	0,56	15,4	9,8	0,6	1,1
	10-15	15,8	0,90	29,2	0,38	14,9	9,5	0	0
	15-20	15,9	1,05	33,0	0,53	14,9	9,6	0	0
	20-25	16,4	1,26	32,0	0,74	15,1	9,7	0,2	0,3
Témoin cultivé	0-25	15,4	0,52	28		14,9	9,6		

(*) Accroissement par rapport au témoin cultivé.

On constate tout d'abord que l'augmentation porte sur les deux formes de matières organiques. L'observation directe des profils de sol sur le terrain montre qu'il y a une concordance satisfaisante entre les quantités de matières organiques libres présentes dans chaque couche et la répartition en profondeur de l'enracinement des deux prairies. C'est ainsi que le système radiculaire du Dactyle est encore abondant entre 20 et 25 cm de profondeur tandis que celui du Ray-grass anglais est presque entièrement localisé dans les 15 premiers centimètres du sol.

En ce qui concerne les matières organiques liées, il faut dès le départ distinguer les deux types de prairie.

— Sous Dactyle, Graminée à enracinement en grande partie *perenne*, l'augmentation de matière organique liée est faible et n'est sensible que dans les 5 ou 10 cm superficiels. Les racines ne se décomposant pas au cours de la vie de la prairie, ce résultat était prévisible. L'élévation du taux de matières liées en surface doit être due principalement à la décomposition de parties aériennes mélangées au sol par la faune (ver de terre).

— Sous Ray-grass anglais, plante à racines principalement *annuelles*, on peut noter que l'augmentation du taux de matières libres s'est accompagnée d'une augmentation de matières organiques liées 2 à 3 fois plus forte provenant de l'évolution dans le sol des générations précédentes de racines.

L'examen des rapports C/N confirme l'allure de ces deux mécanismes d'enrichissement. Ainsi sous Dactyle le C/N des matières liées reste inférieur à 10 et donc voisin de celui du témoin cultivé. Seule la couche superficielle (voir plus haut) présente un rapport C/N légèrement plus élevé révélant la liaison de certaines matières organiques libres. Sous Ray-grass, ce dernier phénomène est général, seule la couche la plus profonde — 20-25 cm — dans laquelle il n'y a pas eu d'augmentation de matières liées présente un rapport C/N proche de celui du témoin cultivé.

Au bout de 3 ans sous prairie, on note donc une nette augmentation du taux des deux formes de matières organiques présentes dans le sol. L'augmentation totale du taux de matières organiques qui en résulte varie avec la profondeur et n'intéresse en fait que, les 15 à 25 cm superficiels suivant les cas.

Les matières organiques libres présentes constituent un stock pouvant atteindre une dizaine de tonnes de matière sèche dans les 25 premiers centimètres du sol. Ce stock peut d'ailleurs s'élever à près de 50 t. pour des prairies de longue durée. Notons dès à présent que, lors du retournement de la prairie et de sa mise en culture, la décomposition d'une telle masse de matière organique pauvre en azote (C/N voisin de 30) posera le problème de la fertilisation azotée de la culture « de défriche ».

Parallèlement à cet enrichissement en matières organiques libres on note un accroissement en matières liées plus ou moins important suivant la profondeur et le type de prairie. Cette matière liée de formation récente ne peut pas dans sa totalité être assimilée à de l'humus. Nous verrons en effet qu'elle disparaît en partie dans les deux années qui suivent le retournement (p. 519). Elle semble constituée à la fois par des produits transitoires de l'humification et par des matières organiques biologiquement stables.

Il est à noter que le bilan ainsi établi au moment du retournement ne reflète que le résultat immédiat du mécanisme d'enrichissement.

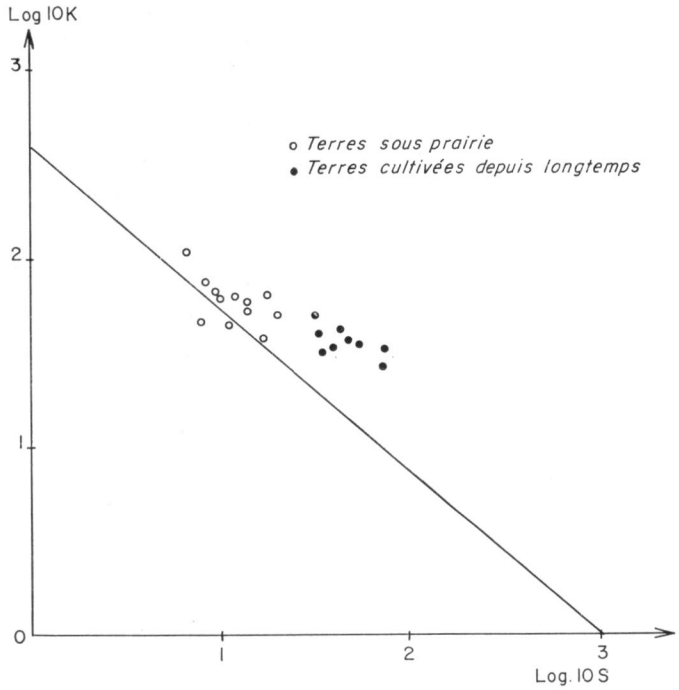
Ce point prendra toute son importance lorsqu'il s'agira d'évaluer l'augmentation de stabilité qu'on a pu observer à partir d'une prairie temporaire. Cette augmentation sera en effet lors du retournement pour une part effective et correspondant à l'accroissement de matière organique liée, et pour une part potentielle puisqu'elle dépendra de la décomposition ultérieure des matières organiques libres.

Amélioration structurale

Lorsqu'on examine le profil cultural sous une prairie convenablement exploitée (voir p. 513), on constate que, dans la plupart des cas, il existe à la surface du sol une couche plus ou moins épaisse, très riche en racines et présentant une structure fragmentaire fine de tendance grumeleuse, souvent même grumeleuse caractérisée. Au fur et à mesure que l'on descend dans le profil, les racines sont plus rares et la structure devient plus grossière, parfois continue. La relation étroite qui existe entre la présence de racines et la structure grumeleuse porte les observateurs à attribuer aux premières un rôle particulier d'agrégation du sol. Il apparaît cependant que si l'on sème une prairie sur un sol extrêmement compact, l'enracinement qui s'ensuit est très mauvais et l'amélioration structurale presque nulle. Les racines des graminées, même lorsqu'il s'agit d'espèces rustiques, n'ont pas le pouvoir de perforer les couches défavorables. Par contre, lorsqu'un enracinement puissant et dense a pu s'installer dans une couche de sol, cette dernière conserve une bonne structure qui peut même

s'améliorer vraisemblablement pour une bonne part en raison de l'augmentation de stabilité structurale que nous allons maintenant examiner.

Le graphique 25 où chaque sol est représenté par un point, dont les coordonnées sont l'indice d'instabilité log 10 S et l'indice de percolation log 10 K fait apparaître clairement que sur l'exploitation agricole dont sont issus tous les échantillons ici représentés, on peut distinguer deux grands types de comportement suivant que les sols sont depuis plusieurs années sous prairie ou en culture. Dans le premier cas, les valeurs de log 10 S varient entre 0,90 et 1,30 et les valeurs de log 10 K entre 1,55 et 2,10. Dans le deuxième cas, les valeurs de log 10 S vont de 1,50 à 2 tandis



GRAPHIQUE 25. — *Comparaison générale de stabilité entre des terres cultivées depuis longtemps et des terres sous prairies dans une même exploitation agricole*

que les valeurs de log 10 K vont de 1,45 à 1,80. Il est donc évident qu'en moyenne sous prairie, dans ces sols de limon, la stabilité est nettement plus élevée. C'est principalement le test de tamisage sous l'eau qui permet de différencier les deux groupes : il n'y a en effet aucun chevauchement de leurs intervalles de variation en log 10 S. Par contre, comme on pouvait s'y attendre, les variations de log 10 K ne sont pas suffisantes pour permettre de distinguer parfaitement les deux groupes de sols. Si l'on examine dans le détail les éléments constitutifs du calcul de S, on s'aperçoit que c'est principalement le taux d'agrégats stables après prétraitement benzène qui a permis la meilleure distinction. Ce phénomène est d'ailleurs général et le tableau 33 *bis* permet de comparer les éléments de stabilité de terres sous prairie et de terres de culture et l'on constate le même rôle privilégié du prétraitement au benzène.

Nous pouvons donc dès maintenant présumer à la lueur des enseignements tirés de la première partie de ce mémoire que l'amélioration de stabilité sous prairie sera liée à une moindre mouillabilité du sol et donc vraisemblablement aux matières organiques qu'il renferme, ce qui nous conduira à considérer comme moins importantes les possibilités de stabilisation par compression due à l'action mécanique des racines, hypothèse mise en avant par certains auteurs.

TABLEAU 33 *bis*

Stabilité comparée de terres sous prairie et sous culture
(Normandie)

	Ag_b		Ag_a		S	K
	%	Valeur indexée	%	Valeur indexée		
Prairie 0-15 (moyenne)	5,5	(289)	15	(203)	2,95	2,85
Témoin 0-15 (moyenne) ...	1,9	(100)	7,4	(100)	8,60	2,20

Mais il est possible de pousser un peu plus loin l'analyse. C'est ainsi qu'au cours de l'étude d'un essai, consacré à l'influence du mode d'exploitation de la prairie sur son enracinement, nous avons comparé les taux d'agrégats stables au benzène et la quantité de racines assimilées aux matières organiques libres de différentes couches de sol dans des parcelles ayant porté depuis trois ans une prairie de Dactyle ou de Ray-grass anglais. Nous avons pu constater à cette occasion qu'il existait une excellente corrélation entre les stabilité exprimée par Ag_b p. 100 et la quantité de matière organique libre. Ce résultat, paradoxal en apparence, puisqu'il ne semble pas pouvoir y avoir une influence des débris végétaux sur la mouillabilité des agrégats à leur contact, peut cependant être interprété en considérant qu'il existe dans le sol une masse de substances pré-humiques liées, très hydrophobes comme nous avons pu le constater au cours de nos expérimentations au laboratoire et qu'on peut raisonnablement estimer en quantité proportionnelle aux matières libres dont elles sont issues. Le tableau ci-dessous présente les régressions traduisant ces liaisons.

	$y = Ag_b\%$ $x =$ racines °/₀₀ —	Intervalle de var. pour racines °/₀₀ —	
R.G.	$y = 0{,}47\ x - 2{,}55$	8,5 à 35 °/₀₀	$P = 0{,}01$
Dact.	$y = 0{,}23\ x - 0{,}05$	10,6 à 32,3 °/₀₀	$P = 0{,}05$

Il aurait été évidemment souhaitable de confirmer ce rôle des produits pré-humiques d'une façon plus directe. Pour cela, il aurait fallu pouvoir les doser séparément et faire une hypothèse concernant leur nature. Comme nous l'avons vu, une telle opération ne pouvait être que très hasardeuse car il est probable qu'ici aussi les substances en question sont constituées par un mélange de corps microbiens tels

que filaments mycéliens, par exemple, et substances pré-humiques proprement dites. Toutefois, deux faits viennent à l'appui d'une telle interprétation. D'abord, on constate, comme nous le verrons, qu'une grande partie de l'augmentation de stabilité obtenue sous trois ans de prairie est fugace, ce qui implique qu'elle soit due à des produits transitoires. Par ailleurs, nous constatons que le coefficient de régression obtenu pour le Ray-grass dans l'expérience précédente est sensiblement plus élevé que celui obtenu pour le Dactyle. Tout se passe donc comme si les racines de Ray-grass avaient une activité stabilisatrice supérieure. Or, on sait (p. 506) que les racines de Ray-grass sont en majorité annuelles tandis que celles de Dactyle sont pérennes au moins dans une certaine proportion. Il s'ensuit qu'il est plausible que la quantité de produits préhumiques actifs soit supérieure pour un taux de racines donné dans les sols sous Ray-grass que dans les sols sous Dactyle puisque dans le premier cas deux générations de racines sont en cours de décomposition la troisième année alors que dans le cas du Dactyle, seule une fraction des racines de ces générations a pu fournir des substances actives. Les résultats du tableau 33 viennent à l'appui de cette hypothèse. Il y a là une présomption supplémentaire en faveur de l'interprétation que nous avons proposée. Nous en trouverons confirmation lors de l'étude du retournement des prairies.

Une expérience de laboratoire nous a permis de préciser ce mode d'action des racines. La mise en fermentation par la méthode des flacons (voir p. 361) de 1 p. 100 de farine de racines de Graminées fourragères avec de l'horizon B du sol de limon de Versailles a provoqué, au bout d'un mois une augmentation sensible de la stabilité structurale. Comme dans le cas des échantillons de sol en place, cette stabilité s'est surtout manifestée ainsi que le montre le tableau 34 par une diminution de la mouillabilité se traduisant par une augmentation du taux d'agrégats stables au benzène.

TABLEAU 34

	Témoin H. B.	H. B. + 1 % farine racines R.G.	H. B. + 1 % farine racines Dactyle
Ag_a % ...	17,4 (100)	22,4 (128)	25,4 (145)
Ag_b % ...	1,6 (100)	4,8 (300)	5,2 (325)

On constate que les résultats sont à peu près indépendants de la nature du matériel végétal utilisé, ce qui confirme que ce n'est vraisemblablement pas par raison spécifique tenant à la structure et aux propriétés de leur tissu que les racines de Dactyle sont dans le milieu naturel moins actives que les racines de Ray-grass anglais.

D'autre part, on peut également noter qu'il n'existe pas en ce qui concerne l'action des racines de prairie la divergence entre les résultats obtenus *in situ* et *in vitro*, que nous avions constatée à propos de l'action des pailles de céréales. En fait, dans les conditions du laboratoire, c'est-à-dire à partir d'un mélange soigneusement réalisé des matières organiques à la masse du sol les résultats sont équivalents ou tout au moins du même ordre de grandeur, quel que soit le matériel végétal utilisé (paille ou racines de Graminées). Par contre, seules les racines de prairie ont une

action au moins équivalente et même supérieure dans les conditions naturelles. Il semble donc bien que ce soit leur répartition très homogène dans le sol qui soit responsable du phénomène. Nous retrouverons indirectement ici le rôle prédominant des substances peu ou non solubles issues des fermentations mais dont l'efficacité est évidemment liée à une répartition aussi homogène que possible. Ceci, nous l'avons vu, est loin d'être réalisé lors des enfouissements de paille tels qu'ils sont le plus souvent réalisés dans la pratique agricole.

En résumé, l'amélioration de la structure d'un sol sous prairie peut être considérée à divers points de vue :

— Tout d'abord, dans un sol convenablement préparé, les racines par leur action mécanique assurent le maintien d'une structure déjà acquise et même améliorent cette structure. Cette action est complétée par celle de la faune qui prolifère dans les sols non travaillés et largement pourvus en matières organiques libres.

— Ensuite, intervient à long terme l'amélioration de stabilité structurale due à un relèvement du taux d'humus. L'importance des restitutions, peut-être aussi un certain ralentissement de la minéralisation de l'humus sous prairie font de cette dernière un appoint précieux pour l'équilibre humique des sols, appoint qui peut devenir indispensable dans les terres où le seuil minimum acceptable pour le maintien de propriétés physiques convenables est trop élevé pour que les pertes annuelles correspondant à ce seuil puissent être compensées par les seuls résidus de récolte, même s'ils sont enfouis dans leur totalité.

— Enfin, l'action la plus spécifique des prairies se rattache au rôle des produits transitoires de décomposition des racines qui, dans le cas des graminées, et sous réserve de certaines conditions dans la préparation du sol pour le semis et dans l'exploitation de la prairie, sont largement répartis dans le sol, assure une efficacité maxima aux sous-produits insolubles ou peu solubles des fermentations.

En définitive, l'amélioration du sol sous prairie, que l'on considère son intensité ou sa répartition suivant la profondeur, est liée au développement du système radiculaire. Aussi est-ce en contrôlant ce dernier qu'on tiendra un moyen d'influer sur la première. C'est à cet aspect du problème que nous allons nous attacher maintenant à rechercher des solutions.

II. — Moyens de contrôle de la répartition des racines et de l'amélioration structurale

Choix botanique : influence de l'espèce

Les constituants des prairies temporaires se rattachent pour la plupart à deux grandes familles botaniques, les Graminées et les Légumineuses. En ce qui concerne ces dernières, les choses se passent très différemment suivant que l'on a affaire à des plantes à racine pivotante, comme la luzerne, ou à des plantes à enracinement branchu ou fasciculé, comme les différents trèfles, lotiers, etc. La luzerne représente typiquement la plante de prairie qui ne peut avoir d'action comparable à celles que nous avons analysées ci-dessus. En effet la densité de son enracinement est relativement faible, si bien qu'elle ne peut avoir *a priori* l'influence favorable sur la répartition des produits de décomposition, condition indispensable de leur efficacité. Le ta-

bleau 35 montre qu'effectivement après trois ans de luzerne, l'accroissement de stabilité structurale est pratiquement nul au moment du retournement et reste négligeable six mois après.

TABLEAU 35

Stabilité au benzène Ag_b %
(Cases lysimétriques C. N. R. A., Versailles)

	Au moment du retournement	6 mois après
Témoin	2,9	2,8
Luzerne	3,1	3,3

Si nous nous reportons à la récapitulation des modes d'action possibles de la prairie, il apparaît que la luzerne peut influer, d'abord sur la structure par l'influence de ses racines ou par l'intermédiaire de la faune du sol dont elle favorise le développement ; elle agit aussi sur la stabilité structurale mais uniquement suivant le processus à long terme et peu apparent de l'élévation du niveau humique du sol. Toutefois, nous avons pu remarquer dans les sous-sols de parcelles cultivées, mais ayant porté quelques années auparavant une luzernière, une perforation verticale correspondant à l'ancien trajet des pivots, ces galeries étant habillées intérieurement d'un revêtement de substances organiques provenant de la décomposition de ces racines. On ne saurait sous-estimer l'importance en ce qui concerne principalement le drainage du sol, son aération et l'exploitation du sous-sol par les racines des cultures suivantes, de ces galeries dont le maintien en sous-sol très instable est vraisemblablement dû à cet enduit organique. Il s'agit là malgré tout d'un phénomène localisé n'intéressant pas toute la masse du sol et pour cette raison, on peut considérer comme nulle l'action stabilisatrice immédiate d'une luzerne. Il est à remarquer que très souvent le salissement des luzernières par des Graminées adventices, les dernières années de leur existence, peut avoir des conséquences heureuses sur l'amélioration, dans la masse cette fois, de la partie superficielle du sol.

Les trèfles n'ont pas fait l'objet de notre part d'une étude particulière dans la mesure où lorsqu'ils sont en culture pure, leur faible durée, de deux ans au maximum, ne permet pas de les comparer valablement à des prairies temporaires tandis qu'ils doivent plutôt être rattachés au groupe des engrais verts.

Pour les graminées, le tableau 36 rassemble quelques données concernant la répartition en profondeur du taux d'agrégats stables après prétraitement benzène sous trois prairies constituées respectivement de Ray-grass anglais — trèfle blanc, Dactyle — trèfle blanc, fétuque des prés-fléole des prés-trèfle blanc, agées de trois ans et installées sur un même sol de limon. Précisons que les conditions d'exploitation ont été les mêmes dans toutes les parcelles et que le témoin représente une terre de vieille culture située à promixité immédiate.

On constate que dans tous les cas il existe une variation très prononcée en fonction de la profondeur et que l'amélioration se trouve localisée dans les 10 premiers

centimètres du sol encore que ce soit les 5 cm superficiels qui soient seuls profondément modifiés. La comparaison entre les différents types de prairie met en évidence l'activité moindre du Dactyle par rapport au Ray-grass anglais ou au mélange fétuque-fléole qui ont une efficacité respectivement triple et double dans les 5 cm superficiels. Les faibles valeurs obtenues sous Dactyle sont vraisemblablement liées au caractère

TABLEAU 36

Comparaison de la stabilité sous trois prairies de graminées
(formations temporaires de 3 ans)

Pourcentage d'agrégats stables au benzène Ag_b %

Profondeur (cm)	Ray-grass	Fétuque-fléole	Dactyle	Témoin
0-5	14,2	9,6	5,4	2,4
5-10	3,7	4,0	4,0	2,5
10-15	3,0	2,3	2,5	2,4
15-20	2,2	2,3	2,2	2,2
20-25	2,1	2,1	2,1	2,1
25-30	1,2	1,5	1,3	1,2

perenne de la majorité de ses racines et peut être également au fait que, comme nous le verrons, cette graminée n'a pas la même tendance que les trois autres à constituer un feutrage radiculaire superficiel lorsqu'elle est exploitée sévèrement, ce qui est précisément le cas dans l'exemple dont il est question ici.

Influence du mode d'exploitation de la prairie

Une observation effectuée dans le département de la Manche nous a conduit à préciser l'importance du mode d'exploitation de la prairie sur le développement du système radiculaire des espèces qui la constituent et donc sur la répartition en profondeur et l'intensité de l'amélioration structurale qu'on peut en attendre. A cette occasion, nous avions comparé l'état du sol sous deux prairies naturelles installées sur des sols comparables, mais qui, pour des raisons de distance à la ferme, avaient été exploitées depuis de longues années, l'une exclusivement en fauche, l'autre en pâturage.

L'examen du profil cultural sous la première fait apparaître une structure grumeleuse se développant sur 30 cm d'épaisseur. L'enracinement est bien réparti et il n'existe pas de feutrage radiculaire en surface. L'ensemble de la couche améliorée est sain, sans présence de gley ni de taches de rouille pouvant indiquer le caractère asphyxiant du sol pendant une partie de l'année. Par contre, sous la prairie pâturée, le système radiculaire est presque entièrement concentré dans les 10 premiers cm qui présentent une structure à éléments grumeleux et fibreux. Ces derniers proviennent de nombreux débris radiculaires en cours de décomposition. Au-dessous de 10 cm, les racines de Graminées sont rares et présentent un aspect filiforme et non

ramifié, une tenue rigide caractéristique d'un milieu défavorable. Dans cette couche, le sol est compact et on y observe des taches de rouille disséminées dans une masse, de teinte claire fréquemment rencontrée dans les sols de limon sous vieille prairie dégradée.

Les résultats du test de stabilité structurale consignés dans le tableau 37 où ils sont exprimés en pourcentage d'agrégats stables après prétraitement au benzène corroborent ces observations :

TABLEAU 37

Stabilités comparées sous prairies de fauche et sous pâture

Profondeur	0-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
Prairie de fauche ..	57,4	33,0	17,9
Vieille pâture	47,2	11,5	3,3

On remarquera que la différence apparaît surtout dans la partie située entre 10 et 30 cm de profondeur, car dans les deux cas la couche superficielle, riche en racines, présente une stabilité élevée.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer ce fait. Dans le cas de prairies naturelles, le mode d'exploitation peut modifier la composition botanique de la prairie et ainsi influer sur la répartition des racines ; la compacité du sol à faible profondeur peut être expliquée par le piétinement des animaux lorsque le sol est détrempé. D'autre part, il semble que pour une même espèce, le comportement du système radiculaire soit différent suivant que les parties aériennes sont supprimées fréquemment ou bien qu'on leur laisse la possibilité d'atteindre un développement plus avancé pouvant aller jusqu'à la floraison.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons entrepris l'étude d'un essai mis en place à la Station centrale d'Amélioration des Plantes du C.N.R.A., à Versailles, et comportant la comparaison sur Dactyle et Ray-grass anglais de trois types d'exploitation :

1° Fauche normale : trois coupes annuelles (A).
2° Pâturage par les moutons : cinq à six passages annuels (B).
3° Fauche au rythme de la pâture (C).

L'observation du sol sur les différentes parcelles après 3 ans de traitement fait apparaître nettement sous les Ray-grass anglais exploités à un rythme rapide la formation d'un feutrage de racines dans les 5 premiers centimètres du sol alors que dans les mêmes conditions ce phénomène n'est pas décelable sous Dactyle. Nous avons cherché à établir une estimation de la quantité de racines présentes dans le sol. Il est évidemment délicat, dès que la prairie a dépassé la deuxième année de séparer les racines vivantes des racines mortes ou des débris d'organes aériens enfouis. Nous nous sommes bornés à isoler l'ensemble de la matière organique libre, ce qui peut se justifier puisque c'est la totalité de cette fraction qui constitue à un moment donné l'apport de la prairie au sol. L'opération a toutefois été effectuée dans le cas présent

en deux temps : Un tamisage à sec d'un échantillon finement broyé représentatif de chaque couche de sol a permis d'isoler les grosses racines mécaniquement résistantes qui constitueront la fraction I de nos résultats. Les radicelles, les racines de tailles diverses plus ou moins décomposées ont été séparées ensuite par centrifugation dans un liquide de densité 2 et constitueront la fraction II. Les deux tableaux 38 et 39 rassemblent respectivement pour les deux espèces les teneurs globales en racines des différentes couches, exprimées en p. 1 000 de terre sèche.

TABLEAU 38

Enracinement du Dactyle

Exploitation	Fauche normale (A)			Pâture réelle (B)			Fauche au rythme de la pâture (C)		
Profondeur (cm)	I	II	Total	I	II	Total	I	II	Total
0-5	4,6	2,1	6,7	4,7	2,7	7,4	5,2	2,6	7,8
5-10	2,0	1,6	3,7	1,1	2,0	3,1	1,5	3,1	4,6
10-15	1,3	1,3	2,6	0,6	1,1	1,7	0,4	2,5	2,9
15-20	0,5	1,6	2,1	0,2	1,1	1,3	0,2	1,4	1,6
20-25	0,5	1,7	2,2	0,2	1,3	1,5	0,1	1,3	1,4

TABLEAU 39

Enracinement du Ray-grass

Exploitation	Fauche normale (A)			Pâture réelle (B)			Fauche au rythme de la pâture (C)		
Profondeur (cm)	I	II	Total	I	II	Total	I	II	Total
0-5	3,7	2,3	6,0	10,4	2,5	12,9	12,0	3,7	15,8
5-10	2,1	1,6	3,7	1,2	1,2	2,4	1,6	1,3	2,9
10-15	0,9	0,9	1,8	0,5	1,2	1,7	1,6	1,8	3,4
15-20	0,5	1,0	1,5	0	1,1	1,1	0	0,9	0,9
20-25	0,5	1,0	1,5	0	0,9	0,9	0	0,9	0,9

De l'examen de ces données on peut tirer un certain nombre de renseignements :

— La suppression fréquente des parties aériennes (traitements B et C) aboutit à une certaine concentration des racines dans les 5 premiers centimètres du sol. Parallèlement, la quantité de racines qui parviennent au-dessous de 15 cm décroît dans une proportion de 50 p. 100.

— Cette évolution est particulièrement nette pour le Ray-grass anglais qui présente un profil radiculaire analogue à celui du Dactyle lorsqu'il est traité en fauche normale mais qui par contre, n'exploite plus que les 20 à 15 premiers centimètres du sol lorsqu'il est pâturé ou fauché fréquemment.

Comparaison de la répartition dans les différentes couches de sol des racines grossières (I) et des racines fines (II) suivant le type de Graminée et les conditions d'exploitation de la prairie.

— Ces évolutions opposées suivant les traitements sont particulièrement visibles sur les grosses racines (fraction I) qui constituent la partie stable du système radiculaire : il semble que leur installation ne soit visible dans un horizon que lorsque l'équilibre s'est établi entre le traitement et la réaction de la plante.

— Les principales différences se situent entre la fauche d'une part, la pâture et la fauche au rythme de la pâture d'autre part. Toutefois ce dernier point ne semble pas devoir être généralisable. Le pâturage par les moutons en effet ne présente pas, ou tout au moins ne présente qu'à un degré moindre, l'inconvénient de provoquer un tassement du sol par suite du piétinement. Dans le cas d'un pâturage par gros bétail et particulièrement lorsque le sol est humide, la dégradation de la structure est beaucoup plus sensible. Il apparaît fréquemment dans les 10 cm superficiels une structure à tendance schisteuse dans laquelle les racines émises ultérieurement seront « piégées » comme dans les feuillets d'un livre.

Les conclusions pratiques de cet essai particulier seront d'abord de souligner l'importance de la fréquence des exploitations. WILLIAMS et BAKER (1957) avaient d'ailleurs abouti à des conclusions analogues sur l'enracinement d'un Ray-grass anglais. En ce sens, il semble bien que l'effet du surpâturage ne puisse être attribué uniquement au piétinement par les animaux. Enfin, les différentes espèces ne réagissent pas de la même manière aux conditions d'exploitation qu'elles subissent ; le Dactyle grâce à son enracinement perenne se montre à cet égard moins sensible au surpâturage. Par contre, il est important de remarquer que le système radiculaire du Ray-grass anglais qui est réputé superficiel est très peu différent de celui du Dactyle dans le cas d'une exploitation à cadence relativement lente.

En conclusion, il convient de souligner l'importance du mode d'exploitation dans la prévision de l'effet escompté d'un repos sous prairie temporaire. En dehors des répercussions probables sur le rendement d'un approfondissement du système radiculaire, particulièrement au cours des périodes de sécheresse, il faut noter les répercussions sur l'amélioration des propriétés physiques du sol qu'on peut attendre des prairies temporaires ou de longue durée. A la limite, un Ray-grass anglais surexploité n'améliorera que quelques centimètres très enrichis en matières organiques. Certes, les poids de racines à l'hectare que nous avons obtenu sous les différents traitements de l'essai décrit plus haut sont du même ordre de grandeur. Mais nous avons déjà souligné l'importance de la notion de mélange et de répartition qui est à l'origine de l'efficacité toute particulière des prairies sur la stabilité structurale De plus, la localisation de la matière organique et de l'amélioration dans les quelques centimètres superficiels présente des inconvénients en ce qui concerne la valorisation de l'effet obtenu.

Influence des conditions d'installation de la prairie

L'enracinement de la prairie est influencé dès sa création par les conditions de la préparation du sol en vue de son installation. Les graines de graminées fourragères sont généralement de fort petite taille et difficilement mouillables. Il s'ensuit que les agriculteurs sont enclins à tasser fortement la couche superficielle pour assurer

l'humectation de la graine. Pour cela, on peut utiliser un rouleau lisse, qui a l'avantage de ne tasser que la couche immédiatement superficielle, mais qui présente le grave inconvénient d'avoir une action irrégulière, et de favoriser le glaçage du sol en cas de forte pluie ; c'est pourquoi les agriculteurs ont de plus en plus tendance à utiliser des rouleaux rayonneurs du type « *cultipacker* » qui ne présentent pas ces défauts, mais qui ont une action très énergique sur presque toute la couche arable. La conséquence de leur passage répété, lorsque le sol est humide, est de constituer à une profondeur variant entre 5 et 15 cm suivant l'humidité et la taille des mottes, une couche compacte qui gênera ultérieurement l'extension en profondeur du système radiculaire. Il est certes indispensable, principalement dans les cas de semis de mélanges d'espèces, d'assurer de bonnes conditions de levée ; toutefois, l'expérience montre qu'il est parfois souhaitable de rechercher un compromis entre la réussite du semis et le développement satisfaisant du système radiculaire qui, lui, conditionne le rendement et la durée de la prairie. Précisons que ce problème se pose principalement à l'occasion des semis de printemps où la partie inférieure de la couche labourée est rarement assez « ressuyée » pour supporter sans se gâcher le passage des engins de tassement.

Une autre opération extrêmement importante au cours de la phase d'installation de la prairie est la première exploitation, dite de « régularisation », dont le but est d'éliminer les mauvaises herbes annuelles qui ont levé en même temps que les graines semées et d'assurer un tallage précoce des Graminées. Cette opération gagnerait à être effectuée à l'aide d'une faucheuse afin d'éviter un piétinement trop précoce Par ailleurs, la première véritable exploitation devrait pouvoir se faire sous forme de foin ou à la rigueur d'ensilage, la coupe au stade dit « pâture » d'une herbe de 20 cm de hauteur contrariant comme nous l'avons vu, et cela surtout l'année d'installation, l'implantation en profondeur du systéme radiculaire.

Relation entre la durée de la prairie et la stabilisation de la structure du sol

La plupart des auteurs s'accordent à reconnaître qu'une prairie doit durer au moins trois ans pour assurer une stabilisation sensible du sol qui la porte. Le tableau 40 montre quelle peut être l'évolution de la stabilité structurale sous un Ray-grass anglais au cours des quatre premières années de son existence :

TABLEAU 40

Stabilité (Ag_b %) entre 0 et 15 cm

	Age de la prairie				
	Création	1 an	2 ans	3 ans	4 ans
Ag_b %	1,7	1,9	2,3	6,6	11,7

Il apparaît qu'effectivement ce n'est qu'entre la deuxième et la troisième année que se produit une amélioration importante de la stabilité structurale, ce qui confirme les données couramment admises. Cette durée minima de trois ans explique l'ab-

sence de réaction de la stabilité structurale du sol à la culture du Ray-grass d'Italie. Cette espèce qui est bisannuelle a la réputation très générale d'améliorer considérablement la structure du sol. Or, le tableau 41 ci-dessous rassemble quelques exemples de comparaisons entre témoins cultivés depuis longtemps et sols depuis deux ans sous Ray-grass d'Italie :

TABLEAU 41

Stabilité comparée (Ag_b%) de terres cultivées et sous Ray-grass d'Italie de 2 ans

	Versailles	Manche	Aspach (1)
Ray Grass d'Italie.....	1,9	6,7	4,8
Culture.....	1,8	6,2	5,0

(1) R.G. retourné depuis six mois.

On constate que dans aucun des cas présentés ici il n'y a eu d'amélioration sensible de stabilité structurale sous Ray-grass d'Italie. La réputation de cette espèce se justifie par contre si l'on s'en tient à la structure proprement dite qui est maintenue fragmentaire par le système radiculaire puissant, très ramifié et à installation rapide de cette graminée. De plus, il est incontestable que l'apport organique qu'elle implique est une contribution positive au bilan humique du sol.

III. — Évolution du sol après retournement de la prairie

Nous venons de passer en revue les principaux facteurs qui déterminent l'intensité et la répartition de la stabilisation de la structure dans un sol sous prairie. Nous allons maintenant examiner l'évolution du sol après la remise en culture.

Nous avons souligné (p. 506) la différence sensible existant entre l'action des prairies temporaires à racines annuelles et celle des prairies à enracinement perenne. Aussi les traiterons-nous dans des paragraphes distincts.

Cas des prairies à racines annuelles prédominantes

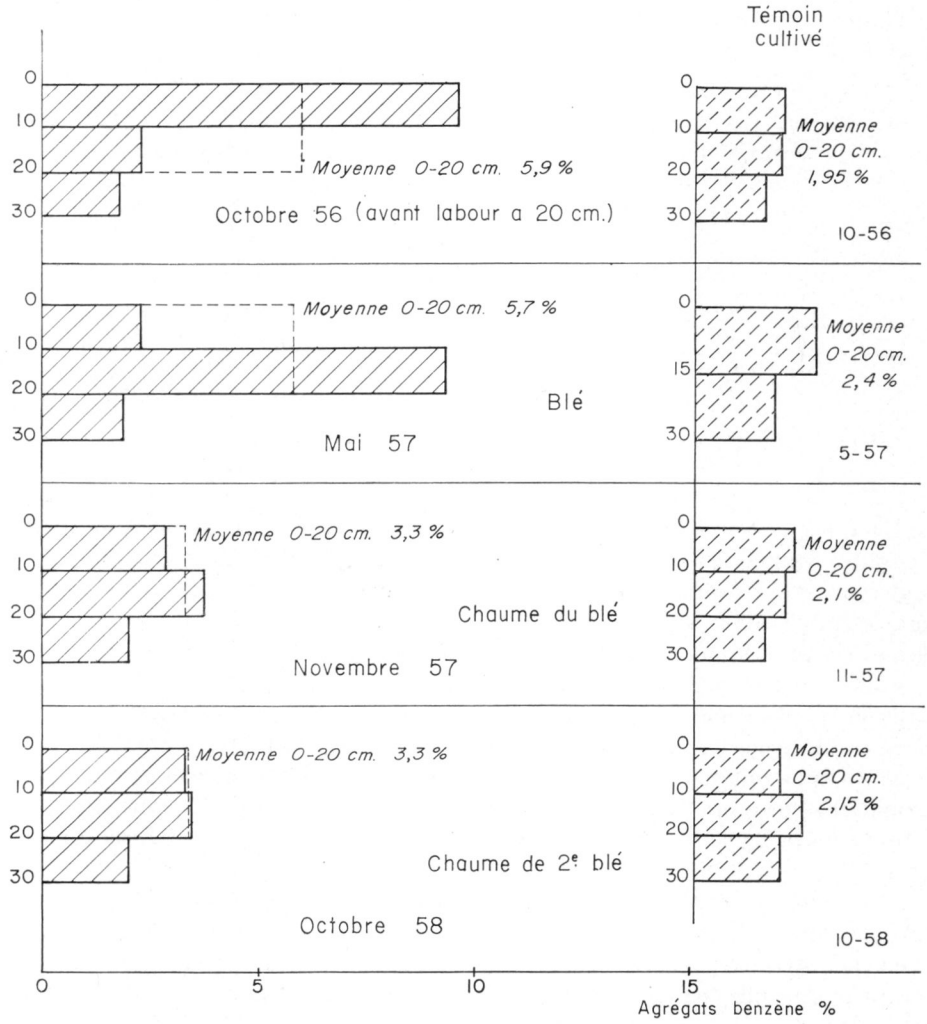
Le graphique 26 indique quelle a été l'évolution de la stabilité structurale dans les différentes couches du sol après retournement d'une prairie temporaire de trois ans composée d'une association Ray-grass anglais-Trèfle blanc installée sur un sol de limon léger en Normandie.

Ce graphique conduit à faire un certain nombre de constatations :

— Au cours de l'hiver suivant immédiatement le retournement, la stabilité qui existait sous la prairie s'est intégralement maintenue. On doit, par ailleurs, noter l'inversion complète du profil consécutive au labour ; celui-ci n'a assuré aucun mélange entre la couche riche en racines et la couche immédiatement sous-jacente. L'observation directe sur le terrain trouve ici une confirmation.

— Par contre pendant les mois chauds de la même année, la stabilité a subi une diminution notable dans la couche la plus améliorée (10-20 cm).

— Cette baisse ne s'est toutefois pas poursuivie au cours de l'année suivante et la stabilité des parcelles ayant porté cette prairie est restée au bout de deux ans sensiblement plus élevée que celle des parcelles voisines en culture continue depuis de nombreuses années.



GRAPHIQUE 26. — *Retournement de prairie Ray-Grass anglais (3 ans)*

Cette évolution peut trouver une explication logique à la lumière de nos conclusions sur les mécanismes de stabilisation sous prairie (p. 511). On peut en effet considérer que pendant la première période chaude après la remise en culture les produits préhumiques labiles responsables de la stabilité élevée notée avant retournement se sont décomposés. La stabilité résiduelle qui s'est maintenue après un an

de culture serait alors due principalement à des produits plus stables assimilables à de l'humus avec l'appoint de produits transitoires provenant des quelques débris de racines encore non décomposés à cette époque.

Cas de prairies à enracinement perenne prédominant

L'évolution du sol après retournement d'une prairie de Dactyle installée sur une parcelle voisine de la précédente est sensiblement différente. Ici en effet on peut noter un accroissement de stabilité *après le retournement* (tabl. 42).

TABLEAU 42

Évolution de la stabilité moyenne (Ag_b %) de la couche arable du sol (0-20 *cm*) *après retournement d'une prairie de Dactyle*

Dates	Octobre 56 (1)	Octobre 57	Octobre 58
Ag_b %	3,2	5,7	3,9

(1) Juste avant le labour.

Ce fait n'est pas surprenant car il correspond au caractère perenne des racines de Dactyle. Au cours de la végétation de cette graminée l'accroissement de stabilité du sol est minime en raison de la faible production de substances transitoires. Par contre, après le retournement les racines se décomposent toutes à la fois et les produits formés stabilisent la structure. Ce type d'évolution peut paraître plus intéressant puisqu'il assure le maximum de stabilité sous culture ; il l'est certainement si l'on s'en tient au seul point de vue des propriétés physiques du sol. Toutefois la décomposition simultanée d'une masse importante de matières organiques à rapport C/N élevé en l'absence de produits transitoires susceptibles de fournir un volant d'azote aisément minéralisable présente des inconvénients culturaux graves si bien que les formations pures de Dactyle sont fréquemment de mauvais précédents pour la culture de défriche, leur effet favorable n'étant apparent qu'en deuxième année de culture.

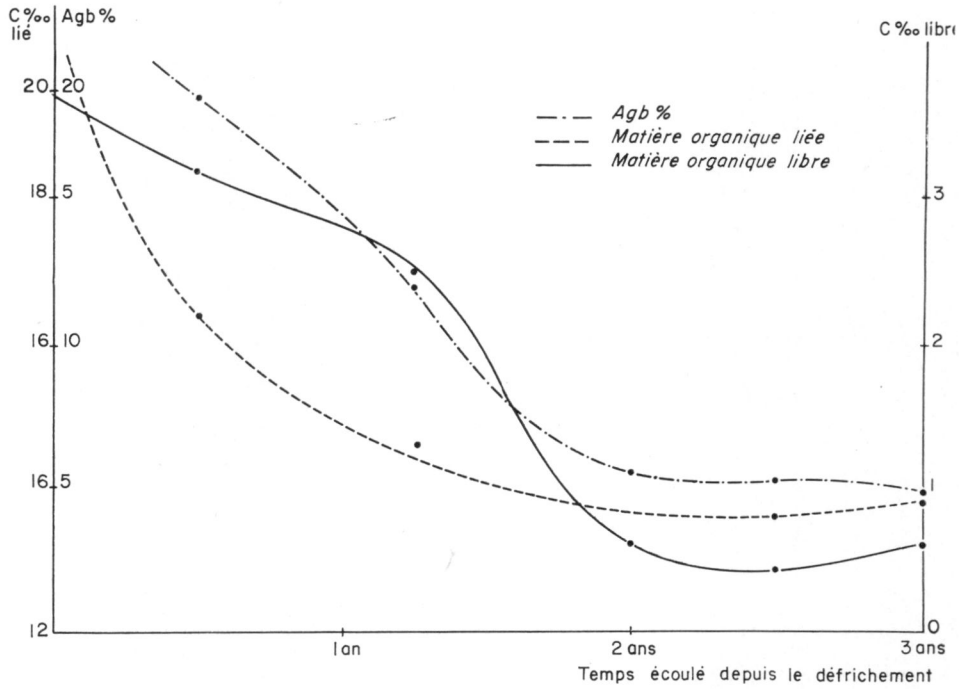
Cette particularité de l'action du Dactyle peut expliquer en partie les désaccords entre les différents auteurs au sujet de son efficacité sur la stabilité de la structure Si en effet les prélèvements ont lieu un certain temps après le retournement la stabilité peut être plus élevée après Dactyle qu'après Ray-grass anglais par exemple, alors qu'à la fin de la vie de la prairie, les résultats sont inversés.

Relation entre l'âge de la prairie et la durée de son arrière-action sur la stabilité structurale

Dans les paragraphes précédents nous avons montré que, dans le cas le plus général de prairies temporaires de courte durée à racines annuelles, la majeure partie de l'amélioration disparaissait au cours de la première année. Ce phénomène est en

accord avec le comportement d'échantillons de sols prélevés sous de telles prairies et soumis à des fermentations à l'étuve (voir première partie, p. 388). Comme nous avions alors noté que la mise en fermentation ne modifiait au contraire que très peu le comportement de prairies plus anciennes, il nous est apparu que la durée de la prairie pouvait influer sur la permanence de l'effet structural produit.

En fait lorsqu'on étudie le comportement de prairies naturelles anciennes après leur remise en culture on trouve deux types de résultats.



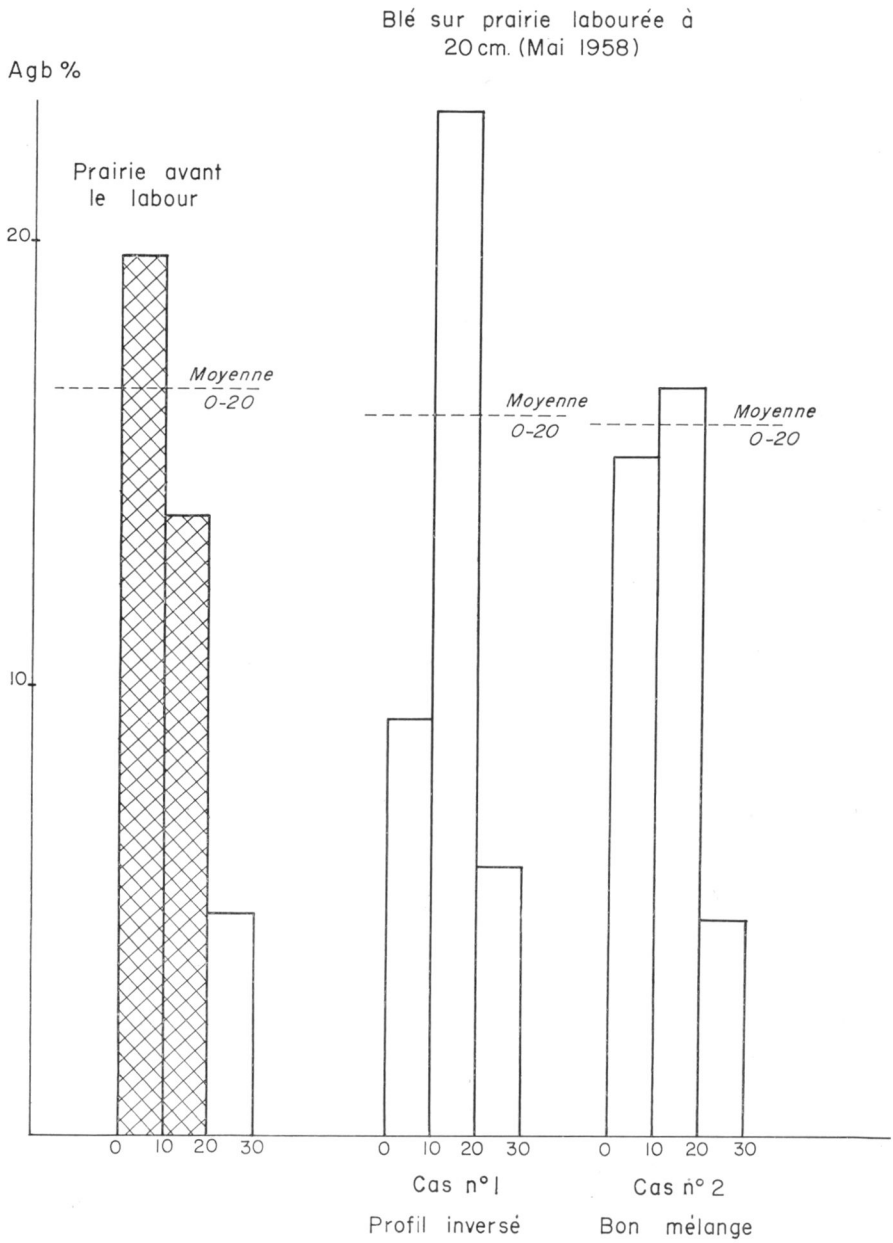
GRAPHIQUE 27. — *Évolution de la matière organique et de la stabilité après le retournement d'une vieille prairie sur sable fin calcaire*

Dans certains cas, l'évolution est très voisine de celle qui suit le retournement de prairie de courte durée : l'accroissement de stabilité est fugace.

Ainsi le graphique 27 représente l'évolution du taux d'agrégats stables Ag_b p. 100 et des taux de matières organiques libres et liées après défriche d'une prairie très ancienne située sur un sol finement sableux et calcaire en arrière de la baie du Mont Saint-Michel.

On constate que la stabilité décroît très rapidement au cours des deux premières années de culture, de même que les taux des deux fractions de matières organiques. Il y avait donc eu sous cette prairie accumulation de produits transitoires et non pas formation d'humus stable.

Mais il existe également des sols qui, après avoir porté une prairie naturelle pendant une longue période, conservent une teneur en matière organique liée et une stabilité structurale élevée plusieurs années après leur remise en culture. Nous avons pu faire des constatations de ce genre dans des terres argilo-sableuses en Sologne et dans des marais argileux de la côte atlantique.



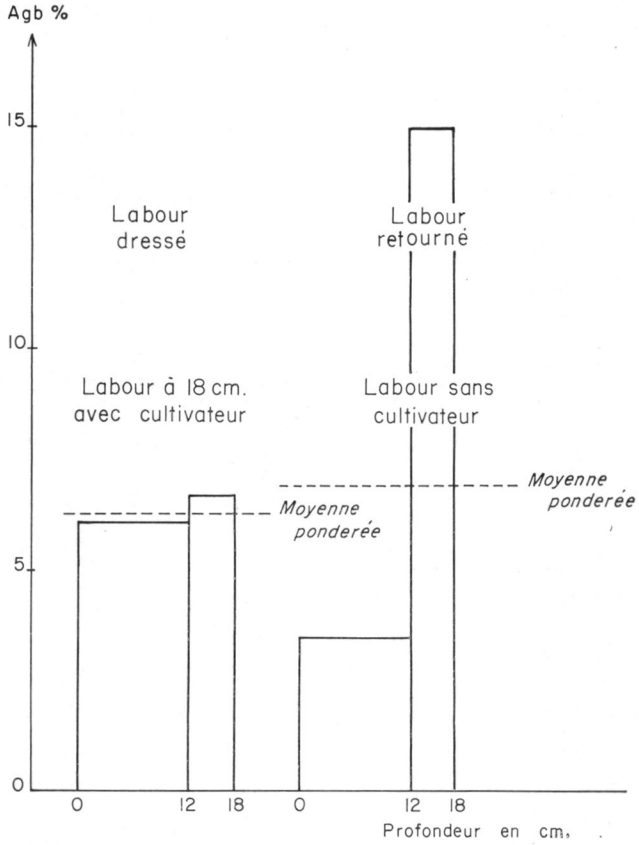
GRAPHIQUE 28. — *Influence du mode de retournement des prairies sur la répartition dans le sol des couches stabilisées*

C'est un cas de ce type que nous avons cité dans le tableau 12 de la page 388.

La durée de la prairie ne semble donc être qu'un des éléments intervenant pour déterminer la durée des arrière-effets sur la stabilité structurale. Très probablement les conditions de l'humification sous la prairie jouent un rôle considérable dans ce domaine.

IV. — Retournement de la prairie

Il ne suffit pas d'avoir considérablement amélioré le sol sous une prairie, encore faut-il assurer son retournement et sa remise en culture dans des conditions telles qu'on valorise au maximum l'effet structural obtenu tout en évitant des accidents culturaux qui sont fréquemment liés, ainsi que nous l'avons vu, à l'incorporation



Graphique 29. — *Influence du mode de retournement (type de labour et pseudo-labour) sur la répartition dans le sol des couches stabilisées*

sans précaution de grosses quantités de matières organiques fermentescibles.

Nous avons vu que dans la plupart des cas l'enrichissement en matière organique par l'intermédiaire des racines de la prairie, l'amélioration structurale due à la présence de ces racines et la stabilisation de cette structure étaient concentrés dans la couche superficielle du sol, en moyenne les 8 à 10 premiers centimètres. Rappelons

que ce phénomène est d'autant plus net que la prairie est plus ancienne et qu'elle a été exploitée dans des conditions plus défavorables. En de tels cas, le labour peut conduire à ce que la partie du sol améliorée et riche en matière organique se retrouve au fond du labour alors que l'ancien proche sous-sol de la prairie peu amélioré, apparaît en surface : c'est le cas 1 du graphique 28. La conséquence d'un tel état de fait est d'abord que la culture immédiatement installée après le défrichement ne bénéficiera pas, au moins au cours des premières phases de son développement, de l'amélioration du sol. D'autre part, l'ancienne couche superficielle, très riche en matière organique fraîche et enfouie loin de l'atmosphère dont elle est séparée par une épaisseur de terre non améliorée et qui risquera à cause de cela de freiner les échanges gazeux, fermentera dans de mauvaises conditions et les risques d'accident par suite de phénomènes réducteurs apparaîtront.

On voit ainsi se dégager les deux grands principes qui doivent présider au retournement des prairies :

— Assurer aussi intimement que possible le mélange de la couche améliorée et riche en matière organique à l'ensemble de la couche arable.

— Assurer des conditions de fermentation des matières organiques telles qu'on évite les accidents par asphyxie partielle du sol.

Compte tenu de ces principes, nous nous proposons de décrire les diverses phases d'une méthode de retournement en indiquant au passage les variantes qui peuvent lui être apportées en fonction des circonstances.

a) *Destruction de la pelouse*

Cette opération toujours utile, devient indispensable dans tous les cas (vieille prairie ou prairie temporaire surpâturée) où il existe un feutrage superficiel. Ce dernier s'il n'est pas au préalable déchiqueté, sera beaucoup plus difficile à mélanger ultérieurement au reste du sol. Un passage de rotovator ou deux passages croisés de pulvériseur à disques, de déchaumeuse ou même de cultivateur à faible profondeur permettent d'assurer la fragmentation de la couche de racines et de rhizomes. Le terrain est alors laissé quelque temps au repos pour permettre aux débris végétaux de sécher et de devenir plus fragile.

b) *Labour*

Le labour doit être dressé et juste assez profond pour éviter le retournement des bandes de terre. Un labour trop profond conduirait à diluer la partie améliorée dans une grande masse de terre de propriétés moins favorables et rendrait plus difficile le brassage ultérieur de toute la couche labourée. Il convient également d'éviter que les rasettes, mal réglées, rejettent au fond de la raie la couche végétale superficielle. Les risques de repousses de mauvaises herbes en seront augmentés mais ils semblent moins graves que les risques d'asphyxie.

c) *Opérations de pseudo-labour*

Si le semis de la culture suivante doit avoir lieu au printemps, le labour est laissé tel quel pendant l'hiver. Il est repris ensuite par des passages croisés de « cultivateur » travaillant à pleine profondeur de façon à assurer un mélange aussi intime que

possible des différentes couches de terre. Dans tous les cas et surtout avant une culture d'hiver, ces opérations gagnent à être effectuées quelque temps après le labour pour éviter d'enfermer à l'abri de l'air des matières organiques très fermentescibles. Le cas 2 du graphique 29 montre comment il est possible en utilisant une telle technique d'obtenir un sol homogène répondant aux diverses exigences que nous avons mentionnées plus haut.

Conclusion

En conclusion de cette étude des prairies, nous soulignerons les points d'accord entre les résultats au champ concernant l'amélioration structurale sous prairie avec ceux que nous avons obtenus par des expérimentations de laboratoire : l'importance des produits transitoires directement issus des matières organiques fraîches incorporée au sol peut être reliée à la durée relativement faible de l'arrière-effet obtenu. D'autre part, l'importance des produits peu solubles également soulignée au laboratoire peut être reliée à l'efficacité très supérieure de la prairie par rapport à d'autres formes d'apport (paille ou fumier par exemple), en raison de la meilleure répartition par les racines des graminées des produits stabilisateurs au sein du sol.

Au point de vue économique, il faut souligner que lorsqu'on étudie la valeur en tant que précédent cultural d'une prairie par l'intermédiaire du seul rendement, comme nous en avons montré un exemple au début de ce chapitre, on fait implicitement la synthèse de toutes les conséquences, positives ou négatives, qu'un repos sous prairie peut avoir sur le sol : bilan des éléments fertilisants, structure du sol, matière organique, faune du sol, parasites, etc. Dans ces conditions, il suffit qu'une de ces conséquences soit particulièrement défavorable sur une culture donnée pour que les effets bénéfiques voient leur action sur le rendement partiellement et même totalement masquée. Il devient dès lors évident que, pour que le principal effet favorable, c'est-à-dire l'effet structural, soit valorisé, toutes les conditions doivent par ailleurs être remplies, particulièrement les conditions de fertilisation.

On peut alors considérer que la prairie assolée constitue une possibilité exceptionnelle d'augmenter la productivité de nombreuses terres dont les propriétés physiques laissent à désirer. C'est même la seule solution pour les sols nécessitant des restitutions humiques très importantes. Mais il ne faut pas perdre de vue que si une prairie représente une potentialité d'amélioration, cette dernière n'est pas automatique. Les conditions d'installation de la prairie, sa composition, son exploitation et la fumure qu'on lui apporte compte tenu de cette exploitation, sa durée, son mode de retournement peuvent limiter et même dans certains cas annuler l'effet recherché. Notre but ici était seulement de préciser les incidences de quelques-uns de ces facteurs sur le poste « propriétés physiques » du bilan d'une prairie temporaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous allons maintenant tenter de faire apparaître d'une manière schématique l'essentiel des résultats de ce travail.

Il s'agissait, en partant de l'étude des mécanismes et des modalités de stabilisation de la structure par les matières organiques, de définir les conditions d'efficacité des différents apports tels que les réalise la pratique agricole.

A partir d'un certain nombre de modèles réalisés au laboratoire, nous avons d'abord cherché à dégager des règles d'action. Celles-ci figurent dans la première partie de ce mémoire, nous les rappellerons brièvement ici :

Les matières organiques présentent des modalités d'action différentes à chacun des stades de leur évolution dans le sol.

— Dans une première phase, les corps microbiens qui se développent abondamment à partir de substances fraîches provoquent des accroissements importants mais brefs de la stabilité structurale.

— Au cours d'une deuxième phase les substances responsables de la stabilisation sont les produits transitoires de l'humification. Leur activité spécifique est généralement inférieure mais la durée de leur action est plus longue que celle des corps microbiens.

A ces deux stades, l'efficacité des substances actives dépend essentiellement de leur répartition au sein du matériau à stabiliser ; les conditions de fermentation, la fermentescibilité des matières incorporées influent également sur l'allure de la stabilisation.

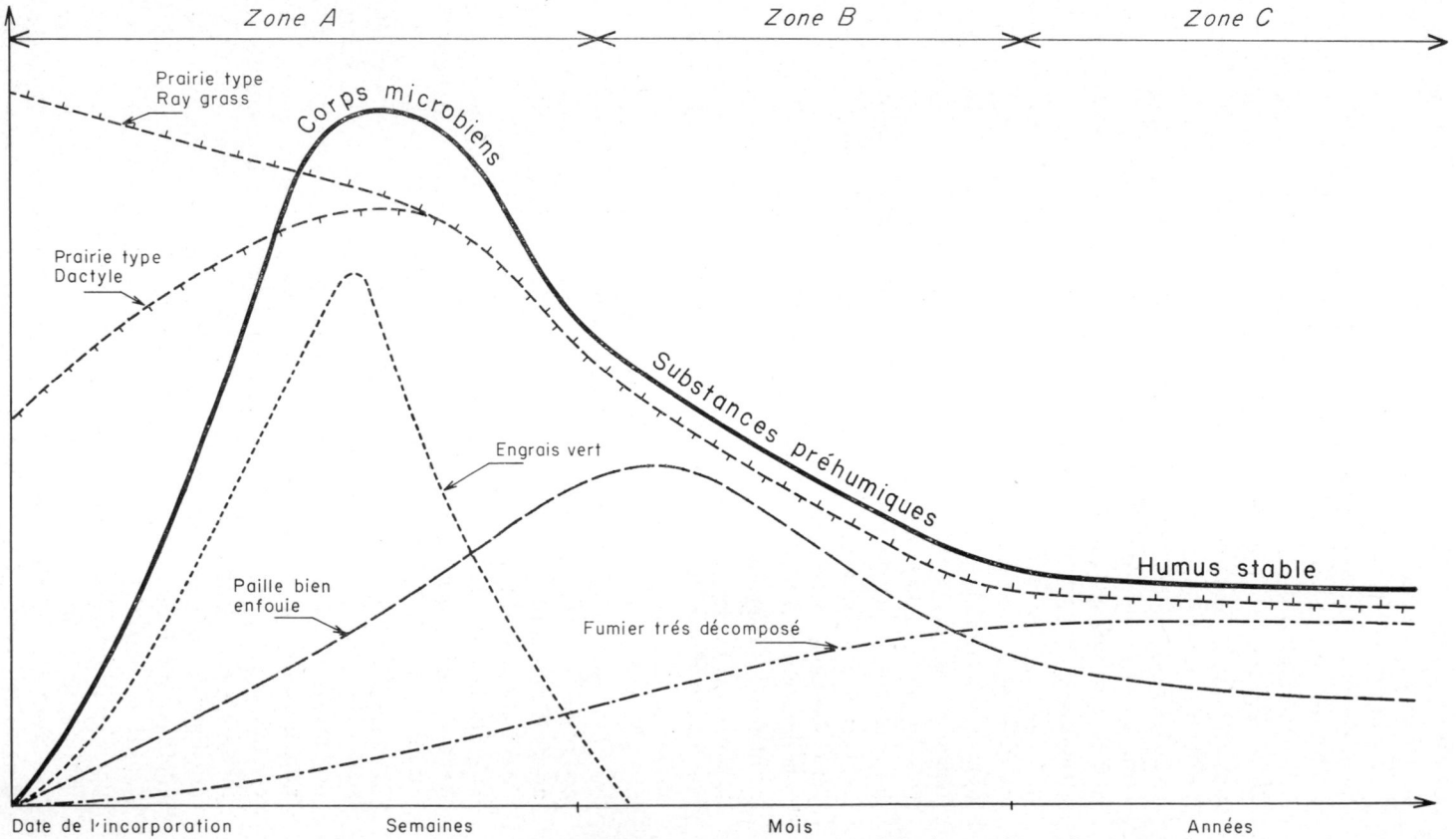
— Enfin, au terme de l'évolution, les produits humiques proprement dits, c'est-à-dire ceux qui sont biologiquement beaucoup plus stables que les précédents, ont une activité spécifique faible dans la plupart des cas. Les résultats obtenus dépendent surtout de la texture et des conditions de leur liaison à la partie minérale du sol. Par ailleurs, leur action est durable et peut donc être considérée comme cumulative.

Nous avons essayé d'établir un schéma général permettant de situer par rapport à ces données, et de discuter les conséquences diverses des techniques intéressées utilisées dans la pratique. C'est là l'objet du graphique 30.

On peut constater qu'en dépit de certaines imprécisions qu'il ne nous a pas été possible de dissiper, les résultats des expériences réalisées en plein champ trouvent une place logique par rapport à ceux qui ont été obtenus au laboratoire. Ceci confirme le caractère général des phénomènes observés sur les modèles. On peut donc considérer que nos conclusions précédentes sont valables en pratique, même si elles ne constituent qu'une première approximation.

Plus précisément, il apparaît que les trois stades d'évolution des matières organiques dans le sol se retrouvent avec les mêmes conséquences dont l'importance

Modèles de Référence	Glucose ou foin de luzerne dans les 15 premiers jours	Pailles végétales 1 à 3 mois après la mise en fermentation	Acides humiques
Facteurs Principaux d'efficacité	Fermen tescibilité Masse de matière enfouie Mélange à la couche arable Date d'enfouissement	Mélange à la couche arable Masse de matière enfouie Conditions de fermentations	Masse enfouie Coefficient isohumique Épaisseur et texture du sol
Remarques	Risques d'accidents (gley)	Risques d'accidents (gley)	Type d'action cumulative
Stabilité structurale			



GRAPHIQUE 30. — *Présentation schématique des différents types de stabilisation par les matières organiques*

relative est variable suivant la nature et la masse des matières végétales enfouies, les conditions de leur incorporation et de leur fermentation.

Comme au laboratoire, les modifications de stabilité sont sensibles, surtout au cours des deux premières phases. Il s'ensuit que les matières les plus fermentescibles sont à cet égard les plus efficaces ; mais corollairement leur action n'est que temporaire. Le résultat de l'enfouissement d'un engrais vert jeune est un exemple extrême de ce type de stabilisation. On retrouve également l'importance d'un bon mélange, qui découle du fait que les produits transitoires n'agissent qu'à proximité de leur point de formation. L'enracinement des prairies de graminées assure parfaitement ce mélange, du moins lorsque les conditions d'une installation et d'un développement normal des racines ont été remplies. C'est alors là qu'il faut trouver la raison de l'efficacité toute particulière à court terme des prairies temporaires sur la stabilité structurale.

Par ailleurs, la masse des produits incorporés et leur coefficient isohumique conditionnent leur contribution au maintien ou à l'augmentation du niveau humique dans le sol. Comme conséquence les mêmes facteurs commandent à moyen et à long terme ce que l'on peut appeler la « valeur-plancher » de la stabilité structurale d'un sol. En raison de la faible activité spécifique des produits humiques stables tels que les acides humiques lorsque la texture du sol n'est pas suffisamment légère le relèvement de ce plancher par un apport isolé n'est généralement pas sensible. Par contre les conséquences d'apports répétés sont cumulatives.

A ce point de vue les engrais verts dont le coefficient isohumique est extrêmement faible sinon nul ne peuvent avoir qu'une action directe immédiate et non cumulative. A l'opposé, des apports réguliers de fumier dont l'action à court terme est minime en raison de sa faible fermentescibilité contribuent au maintien ou à l'élévation de la valeur-plancher.

Quant aux prairies temporaires elles ont l'avantage de présenter successivement les deux modes d'action : la formation de produits transitoires à partir des racines, avant même le retournement (Graminées à enracinement annuel) ou immédiatement après (Graminées à enracinement perenne), assure un accroissement considérable de stabilité à court terme.

Par la suite, la masse importante de matière sèche incorporée au sol aboutit à une élévation du taux d'humus stable et donc à la part de stabilité durable qui lui est liée.

Il faut noter, par ailleurs, que l'incorporation de matières végétales peut présenter de graves inconvénients : dans la mesure même où les fermentations sont rapides et contribuent ainsi à un accroissement important de la stabilité structurale, elles s'accompagnent de phénomènes secondaires provoquant l'apparition de conditions réductrices dans le sol. Fort heureusement la nécessité que nous avons mentionnée, d'assurer un mélange intime de l'amendement organique et du sol, est aussi un facteur de sécurité à cet égard car il diminue le risque d'accidents dus à ces effets secondaires.

Il est possible, en partant d'un tel ensemble de données, de tenter de définir une « politique » des matières organiques en relation avec les conséquences de leur utilisation sur la structure du sol. Une telle politique doit se situer à deux niveaux :

Tout d'abord, la conservation du taux d'humus par le choix d'un assolement, d'un système de culture, de techniques culturales permettant d'équilibrer les pertes

annuelles. Les conséquences d'une telle orientation peuvent n'être sensibles qu'à long terme et il est difficile, lorsque des impératifs économiques vont à l'encontre de ces impératifs techniques, de trancher systématiquement en leur faveur.

Mais il existe aussi un autre point de vue lié à la dynamique des phénomènes et qui consiste à maintenir une stabilité suffisante en valorisant au maximum tous les produits transitoires provenant de la décomposition de la totalité des résidus de récoltes.

Alors que, dans le premier cas, il faut surtout s'attacher à conserver un minimum de « sécurité », dans le deuxième, on doit chercher à mettre au point des techniques adaptées aux conditions de chaque exploitation agricole permettant de faire rendre le maximum aux amendements organiques gratuits que constituent les résidus de récolte sous leurs différentes formes.

Enfin le dernier renseignement que nous avons tiré de cette étude est d'ordre méthodologique. Nous pensons en effet avoir montré que l'étude des phénomènes agronomiques dont on ne peut établir au champ que la tendance résultante à partir d'appréciations souvent très fluctuantes peut difficilement permettre une interprétation sans une analyse à l'aide de modèles. Ceux-ci sont constitués par des expériences de laboratoire et toute la difficulté consiste alors à vérifier qu'ils sont bien représentatifs. C'est par la variété des conditions et par le fait qu'en dépit de ces différences on aboutit à des conclusions convergentes, que l'on peut juger si l'analyse porte bien sur des aspects fondamentaux du phénomène. Réciproquement, les modalités des conditions expérimentales devront constituer les divers caractères que praticiens et techniciens s'efforceront de retrouver dans le milieu naturel pour raisonner les techniques culturales et plus encore pour en apprécier les effets.

SUMMARY

EFFECT OF THE ORGANIC MATTER ON THE STABILITY OF THE SOIL STRUCTURE

SECOND PART

The transposition to the practice of the results given in the first part rendered necessary a double preliminary work.

The first one comes from the fact that, in a natural medium, the application of a treatment, precise though it may be, arouses very different effects. A method of analysis of the total effect, based on the study of the « culture profile », is presented.

On the other hand, the importance of the dynamics of the phenomena underlined in the first part led us to study the state and evolution of the organic matter in the soil. This study showed the interest of a fragmentation, on one hand into free substances which only represent the potentiality of a stability amelioration and on the other, into bound substances, responsible for the immediate properties of the soil.

The main types of organic additions are then presented and their effects, appraised by means of field experiments or of isolated observations, are interpreted by comparing them with the results obtained in the laboratory. Then, the effect of the crop residues, of the manure and of the half fermented organic fertilizers, and of the green manure on one hand, and in a more detailed way, the effect of a soil resting under meadow on the other, on the structural stability are analyzed.

It appears that the three types of stabilization, corresponding to the successive phases (microbial agents, prehumic products, humus) of the evolution of the organic matter, are also found in the field.

Their relative importance varies in a similar way, according to the nature and mass of the vegetal matter buried and to the conditions of their incorporation and of their fermentation.

Some very fermentiscible additions which have a very low humus yield or even none at all (young green manure) give very intense effects, but they are of short lasting and only correspond to the first stage of evolution.

Others, such as for instance a well disintegrated manure, have on the contrary, only long term effects and take part in the keeping of a basic level of stability, in connection with the humic content in the soil.

Lastly, the roots of temporary grassland which, by their distribution in the soil, insure optimal conditions for the effectivity of the prehumic matter and which, by their mass, allow an important humic restitution, show successively the two types of actions described. The keeping of the soil under grassland, under consideration of certain conditions, may therefore be considered as the most effective way to keep and even notably increase the stability of the soil structure.

***

Thus, the modes of action, on the structure stability, of the main types of organic additions which are used in agriculture, have been defined in their main lines by comparing the schematical laws found in the laboratory with the different elements resulting from an analysis of the natural phenomena.

It is then possible to appraise correctly the different means which are at our disposition to have an action on a fundamental property of the soil.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG DER ORGANISCHEN MASSE AUF DIE STABILITÄT DER BODENSTRUKTUR

ZWEITER TEIL

Das Übertragen auf die Praxis der im ersten Teil erwähnten Resultate erforderte eine doppelte vorbereitende Arbeit.

Die erste ergibt sich aus der Tatsache, dass in einem natürlichen Milieu die Anwendung eines Verfahrens, so bestimmt es auch sei, sehr verschiedene Wirkungen auslöst. Deshalb wird eine Untersuchungsmethode des summarischen Effekts, auf der Kontrolle des « Kulturprofils » fussend, aufgezeigt.

Andrerseits führte die Bedeutung der Dynamik der im ersten Teil unterstrichenen Erscheinungen zum Studium des Standes und der Evolution der org. Masse im Boden. Dieses Studium zeigte das Interesse einer Fraktionierung einerseits in freie Masse, die nur die Potenz der Stabilitätsverbesserung darstellt, und andrerseits in gebundene Masse, verantwortlich für die Soforteigenschaften des Bodens.

Es wurden die wichtigsten Typen des Einbringens der org. Masse sowie ihre Effekte durchgenommen, bewertet nach Feldversuchen oder Einzelbeobachtungen, und durch Gegenüberstellung mit den im Labor erzielten Resultaten ausgelegt.

Dann werden die Wirkung der Ernterückstände, des Stallmists und der halb-fermentierten organischen Bodenverbesserung und der Gründünger einerseits, und etwas ausführlicher die Wirkung der Bodenruhe unter Wiese auf die Strukturstabilität andrerseits untersucht.

Es zeigte sich, dass die drei Stabilisierungstypen den verschiedenen Phasen der Evolution der org. Masse (Bakterien, vorhumöse Produkte, Humus) auch im Felde wiederum in Erscheinung treten. Ihre relative Bedeutung ändert sich auf gleiche Weise, je nach Art und Masse der untergebrachten pflanzlichen Masse, und je nach den Bedingungen ihres Einbringens und ihrer Fermentation.

Gewisse, sehr fermentierbare Gaben, deren Humusertrag schwach oder gleich null ist (junger Gründünger) erzeugen intensive Wirkungen, jedoch nur von kurzer Dauer, und nur der ersten Evolutionsphase entsprechend.

Andere, so z. B. gut verotteter Stallmist, haben hingegen nur Wirkungen auf lange Sicht, indem sie an einem Grundniveau, das an die Humusrate des Bodens gebunden ist, teilnimmt.

Die Wurzeln der Wechselwiese endlich, die durch Verteilung im Boden der Wirkung der vorhumösen Stoffe optimale Bedingungen bieten, und durch ihre grosse Masse eine wichtige Rückerstattung liefern, besitzen nacheinander die zwei Typen der vorhergehenden Wirkung. Wird der

Boden unter Wiese gehalten, unter Einhalten gewisser Bedingungen, so ist dies das wirksamste Mittel um die strukturale Stabilität des Bodens zu erhalten und sogar empfindlich zu erhöhen.

***

So konnten die Wirkungsmodalitäten auf die Strukturstabilität der wichtigsten, in der Landwirtschaft gebräuchlichen Typen organischer Einbringung in den grossen Zügen durch Gegenüberstellung der systematischen, im Labor erhaltenen Regeln mit den verschiedenen Elementen die sich aus der Untersuchung der natürlichen Erscheinungen ergeben, bestimmt werden.

Es wird alsdann möglich, die verschiedenen Mittel, die zwecks Einwirkung auf eine fundamentale Bodeneigenschaft zur Verfügung stehen, genauer zu beurteilen.

Действие органического вещества почв на устойчивость их структуры.

Г. МОННЬЕ (Версаль).

РЕЗЮМЕ

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Транспонировка результатов, приведенных в первой части, в практические условия, вызвала необходимость предварительной работы в двух направлениях : Первое — вытекает из того факта, что в природной среде, применение обработки, с какой бы точностью она ни была определена, вызывает самые разнообразные действия. Автор предлагает метод анализа общего эффекта, вытекающего из этих явлений и основанного на изучении « профиля обработки».

С другой стороны, значение динамики этих явлений, подчеркнутое в первой части привело автора к изучению состояния и эволюции органического вещества в почве. Изучение это доказало что представляет интерес разделять его, с одной стороны, на вещества свободные, являющиеся только потенциальностью повышения устойчивости, и, с другой — на вещества связанные, ответственные за свойства почв в данный момент.

Затем, следует обзор главных форм органических удобрений и обсуждение их эффектов, определенных с помощью полевых экспериментов или изолированных наблюдений, и их сопоставление с результатами полученными в лаборатории.

Потом, анализируется, с одной стороны, действие остатков пред' идущих урожаев, навожения, полу-перебродивших органических удобрений и удобрений зеленых и с другой, более детально, влияние почвенного пара под лугом, на устойчивость поч венной структуры.

Выяснено, что три типа стабилизаiции почв, соответствующие последовательным фазам (микробы, предшественники гуммуса, гуммус) эволюции органических веществ, наблюдаются в полевых опытах. Их относительное значение изменяется одинаково, в зависимости от природы запаханного растительного вещества, от условий его внесения и условий в которых протекает брожение.

Некоторые из внесенных веществ, легко поддающихся брожению, но эффективность которых, в смысле производства гуммуса, весьма слаба или вообще равняется нулю (молодое зеленое удобрение), проявляют интенсивную деятельность кратковременного характера, соответствующую только первой фазе эволюции.

Иные, как например сильно разложившийся навоз, принимающий участие в поддержании основного уровня устойчивости, зависящего от содержания гуммуса в почве, вызывают последствия по истечении дли тельного срока.

И, наконец, корневая система временных лугов, создающая благодаря своему размещению в почве, оптимальные условия для эффекктивного действия предшественников гуммуса и фаворизирующая восстановление гуммуса в широких размерах благодаря своей массе, может оказывать последовательное действие обоими указанными способами. Таким образом, сохранение почвы под лугами, может рассматриваться, при соблюдении определенных условий, как самый эффективный способ поддержания и даже крупного увеличения прочности почвенной структуры.

***

Таким образом, при помощи сопоставления схематических моделей полученных в результате лабораторных испытаний с различными данными анализа природных явлений, атору удалось определить в общих чертах способы воздействия на устойчивость почвенной структуры гдавными формами органических удобрений употребляющимися в сельском хозяйстве.

Таким образом, возможно оценить с большей точностью, разные имеющиеся в нашем распоряжении способы воздействия на олно из важнейщих свойств почв.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P. 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron.* Série A, p. 165.

ANSTETT A. 1956. Sur une méthode rapide de détermination du rapport C/N dans les sols, les amendements organiques et les végétaux. *C. R. VIe Congrès Sci. du Sol*, Vol, B, p. 693, Paris.

AVET M., 1924. *Bull. Biol Fr. et Belg.* Vol 63, p. 149-318.

BACHELIER G., 1961. *La faune du sol et son action.* Orstom Paris.

BARBIER G. et BOISCHOT P., 1954. Cinq années d'expérience sur la fumure à la paille. *C. R. Acad. Agric.* Séance du 13-1-54.

BARBIER G. et CHABANNES J., 1961. Interaction de la fumure organique et de l'azote minéral. *Agrochimica* **5**, n° 3, p. 217-227.

BARBIER G. et KEILLING J., 1960. Le problème de l'humus dans l'agriculture moderne. *Tech. agric. Cah.* 1360, Paris.

BENOIT et *al*, 1962. Effect of a rye winter cover crop on soil structure. *Agron. J.*, **54**, n° 5.

BÉTRÉMIEUX R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse. Thèse Paris, *Ann. agron.*, **2**, 193-295.

BÉTRÉMIEUX R., LE BORGNE E., et MONNIER G., 1960. Évolution de certaines propriétés du sol sous l'influence du chauffage. *C.R. Acad. Sci.* **251**, 2753.

BRADT et *al* 1947-48. *Some change in a soil after ten years of sod green manure and fertiliser treatment.* Hortic. Exper. St. Rep., Ontario Dept. of Agric.

BREMNER J., 1955. Recent work on soil organic matter at Rothamsted. *Z. f. Pflanzenerähr* **69**, p. 32-38.

CHAMINADE R., 1958. Influence de la matière organique humifiée sur l'efficacité de l'azote. *Ann. agron.*, **9**, 167-192.

COMBEAU A., 1960. Quelques facteurs de la variation de l'indice d'instabilité structurale dans certains sols ferralitiques. *C. R. Acad. Agric.*, 109.

DEB B. C., 1950. Dosage du fer libre dans le sol. *J. Soil Sci. Oxford*, **1**, 212.

DEMOLON A., 1948. *Principes d'Agronomie.* Dynamique du sol., p. 99 Dunod, Paris.

FEODOROFF A., 1960. Évaluation de la stabilité structurale d'un sol (Indices), Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, **11**, 651-659.

FLAIG W., 1955. In *Proc. nat. Acad. Allahabad*, **24**, A, Part. III.

FORSYTH W. G. G., 1950. Studies on the more soluble complexes of soil organic matter. *Biochem. J.* **2**, 141-146.

FRAUG H. et LEITENBERGER L., 1948. *Osterreich. Zool. Zeitschr.* **1**, 499-518.

HÉNIN S., 1938. *Étude physicochimique de la stabilité structurale des terres.* Thèse Paris.

HÉNIN S., 1944. Influence des corps microbiens sur la formation d'une structure stable. *C. R. Acad. Agric.*

HÉNIN S. et DUPUIS M., 1954. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. agron.* **15**, 17.

HÉNIN S. et TURC L., *a*, 1949. Essai de fractionnnement des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Agric.*, **35**, 41-43.

HÉNIN S., et TURC L., *b*, 1949. Nouvelles observations sur la variation annuelle de la stabilité structurale du sol. *C.R. Acad. Agric.*, n° **35**.

HÉNIN S., CARDEY F. et ROESCH A., 1956. Méthode permettant le contrôle de la résistance des conditionneurs de sols aux actions microbiennes. *C.R. Acad. Sci.*, **243**, 1899.

HÉNIN S., et MONNIER G., 1956. Évaluation de la stabilité structurele du sol. *C. R. VIe Congrès intern. de Sci. Sol.* Paris, vol. B., 49-52.

HÉNIN S., et MONNIER G., et COMBEAU A., 1895. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.* **9**, 73-92.

HÉNIN S., MONNIER G., et TURC L., 1959. Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R., Acad. Sci.*, **248**, 138.

HÉNIN S., FEODOROF A., GRAS R., et MONNIER G., 1960. *Le Profil Cultural. Principes de physique du sol.* Société d'Édition des Ingénieurs agricoles. Paris.

KORTLEVEN 1963. Quantitative aspeckte von humus bildung und humus abbau Verts. *Landbouwk Onderz.* **9**, 1 109.

LE BORGNE E., et MONNIER G., 1959. Influence du feu sur certaines propriétés du sol. *C.R. Acad. Sci* **248**, 1549.

LE BORGNE E., 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Ann. de Géophys.* **16**, 2.

MAC VICKAR et *al* 1946. The effect of cover crop on certain chemical and physical properties of Onslow fine sandy loam. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **11**, 47-49.

MARSHALL T. J., 1962. The nature, development and significance of soil structure. *Transaction Joint meeting Comm.* IV and V ISSS (New Zealand).

MARTIN G., 1963. Dégradation de la structure des sols sous culture mécanisée dans la vallée du Niari. *Cahiers O.R.S.T.O.M., Pédologie*, **2**, 8.

MÉRIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. *C. R. Acad. Agric.*

MEYER **L.**, 1943. Bodenk. et Plf. **29** (74), 119-140.

MONNIER G., 1957. Influence des prairies temporaires sur la structure d'un sol de limon. *C. R. Acad. Agric.* 20 février.

MONNIER G., 1958. Influence du mode d'exploitation des prairies sur la profondeur de leur enracinement. Incidences sur l'amélioration de la structure et de la stabilité structurale du sol. *C.R. Acad. Agric.* 23 avril.

MONNIER G., 1958. Mécanisme de l'enrichissement en matières organiques d'un sol de prairie. *C. R. Acad. Sci.* 247, 1769.

MONNIER G., TURC L., et JEANSON-LUUSINANG V., 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.* **13** (1), 55-63.

MOREL R., RICHER A. et MASSON P., 1956. Étude expérimentale de la variation du taux de matière organique du sol dans le champ d'expérience de la station agronomique de Grignon. *Ann. agron.* **7**, 183.

MOREL R. et MASSON P., 1958. Étude de la structure du sol des parcelles du champ d'expérience de Grignon *C.R. Acad. Agric.*, **8**, 406-410.

SCHLOESING Th., 1885. *Chimie agricole.* Encyclopédie Frémy. Dunod. Paris.

SWABY R. J., 1950. Influence de l'humus sur l'agrégation du sol. *Journal soil Sci.* T. I., 182-195.

TURC L., 1949. Sur la matière organique du sol fractionnée par densité. *C. R. Acad. Sci.* **229**, 227-228.

VAN RHEE J. A., et NATHAN, 1961. Observations on earthworm population in orchard soils. *Netherl. J. Agric. Sci.*, **9**, 94-1000.

WILLIAMS T. E. et BAKER H. K., 1957. Studies on the root development of herbage plants. *J. Brit. Grassland Soc.*, **12** (1, 2 et 3).

YODER A., 1936. A direct méthod of agregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *J. Amer. Soc. Agron.*, **28**, 357-351.

BAVER L. D., 1956. *Soil physics.* Wiley New York 489.

DEMOLON A., 1952. *Principes d'Agronomie. Dynamique du sol.* Dunod Paris 1 vol. 520 p.

DUCHAUFFOUR Ph., 1960. *Précis de pédologie.* Masson et Cie Paris.

HÉNIN S., FEODOROFF A., GRAS R., et MONNIER G., 1960. *Le Profil Cultural. Principes de Physique du Sol.* Société d'Édition des Ingénieurs agricoles Paris.

JACQUIN F., 1963. Notions récentes concernant le bilan humique d'un sol cultivé. *Bull. AFES*, 10 octobre 1963.

KONONOVA. *Soil organic matter* (traduction anglaise) Pergamon Press Oxford, London, New York, Paris, 1 vol 450 p.

POCHON J., et de BARJAC H., 1958. *Traité de microbiologie des sols*. Applications agronomiques. Dunod, Paris.

RUSSEL E. W., 1961. *Soil conditions and plant growth*. 9e édition Longmans, Londres.

TROUGHTON A., 1957. The underground organs of herbage grasses. *Commonweath Bureau of Pastures and Field Crops Hurley*. Berkshire. Bull. nº 44.

KUTESCHERA LORE 1960. *Wurzel Atlas mittel europaïscher Ackerunkraüter und Kulturpflanzen*. DLG. Verlag G. M. B. H. Francfort s.Main.

Ann. agron., 1965, **16** (5), 535-551.

QUELQUES EXEMPLES DE L'UTILISATION D'UN ENGRAIS PHOSPHATÉ RADIOACTIF POUR L'ÉTUDE DE L'ALIMENTATION PHOSPHORIQUE DES PLANTES DANS LE SOL

R. BLANCHET, J. MORIZET, Colette CHAUMONT et C. MAERTENS

Station d'Agronomie, Toulouse (Haute-Garonne)
Station d'Agronomie, Châteauroux (Indre)

SOMMAIRE

L'étude de l'alimentation phosphorique des plantes dans des sols très divers, ne renfermant parfois que de faibles quantités de terre fine, a été effectuée au moyen des « valeurs A » préconisées par FRIED et DEAN (1952). Les essais ont été réalisés au champ et en vases de végétation ; les teneurs en phosphore labile (valeurs L) ont été également déterminées. Les résultats obtenus par ces diverses techniques sont discutés, ainsi que leurs conséquences agronomiques.

INTRODUCTION

S'il est relativement facile, à l'aide de techniques chimiques ou isotopiques, de connaître l'importance des réserves phosphoriques des sols, c'est-à-dire la quantité d'ions PO_4 retenus sous des formes approximativement adsorbées, il est plus ardu de juger de leur efficacité à l'égard de l'alimentation des plantes. Les propriétés physico-chimiques du sol interviennent en effet dans l'alimentation (pouvoir adsorbant, mobilité et potentiel électrochimique des ions PO_4...). D'autre part, les caractères du profil exercent également une action importante : régime hydrique, quantité de terre exploitée par les racines, interactions avec les autres facteurs de la croissance, en particulier, l'aération...

Ces considérations ont conduit FRIED et DEAN (1952) à proposer une méthode directe d'appréciation de l'efficacité des réserves du sol, en comparant leur participation à l'alimentation à celle d'une fumure bien connue. Cette méthode permet

également de connaître le degré d'utilisation de la fumure, problème qui a fait l'objet de nombreuses controverses (BARBIER et *al.*, 1954).

Avant d'exposer les techniques que nous avons employées et les résultats obtenus, il paraît utile, afin d'éviter toute confusion, de rappeler brièvement quelques principes d'utilisation. Presque simultanément, deux méthodes comportant la culture de plantes en présence de P^{32} ont en effet été proposées :

1° La méthode de LARSEN (1952), qui permet de déterminer la quantité de phosphore approximativement adsorbée par le sol, et susceptible de participer à l'alimentation des plantes (valeur L). Elle s'exprime en quantité de P par unité de poids de sol (p.p.m.). La valeur L est indépendante des facteurs de potentiel, mobilité, etc...

2° La méthode de FRIED et DEAN (1952) dont le but est d'apprécier directement le « pouvoir alimentaire » du sol, c'est-à-dire son aptitude à l'alimentation des plantes, en la comparant à celle d'une fumure phosphatée donnée, que l'on peut appeler « standard », ou « étalon », Cette aptitude est exprimée par la valeur « A », qui représente l'*efficacité* alimentaire des réserves du sol (et non la *quantité* de réserves). Elle est calculée en kg/ha P_2O_5 de l'engrais utilisé pour sa détermination, par exemple en kg/ha de P_2O_5 du superphosphate.

Ainsi que l'a souligné FRIED (1962), une certaine confusion s'est établie entre les deux méthodes, qui font appel à des procédés apparemment voisins, quoique leurs principes et leurs buts soient fondamentalement différents :

a) Dans la méthode de LARSEN, le ^{32}P, avec ou sans entraîneur, est mélangé très intimement au sol, de façon que la dilution isotopique (ou distribution isotopique), soit *complète* et aussi rapide que possible. Ce but est atteint lorsque, dans la plante, le rapport $^{32}P/^{31}P$ reste constant dans le temps ; la valeur L peut alors être calculée. Elle n'indique que la quantité de réserves, et non leur assimilabilité, qui dépend d'autres facteurs (potentiel électrochimique, mobilité... ; BLANCHET, 1959). Une indication de l'assimilabilité est toutefois obtenue par la quantité de ^{31}P absorbée par la plante, qui représente un résultat accessoire, quoique très intéressant, de la détermination de la valeur L.

b) La méthode de FRIED et DEAN suppose au contraire que la plante s'alimente d'une part aux dépens des réserves du sol, d'autre part aux dépens de la fumure radioactive apportée, et que les deux sources restent bien distinctes. Dans ce cas, *la dilution isotopique doit donc être inexistante*, de façon que l'on puisse distinguer dans la plante le phosphore qui provient de l'engrais et celui qui provient du sol. L'alimentation des plantes à partir des réserves du sol d'une part, et à partir de la fumure d'autre part, est alors comparée.

Cette nécessaire absence de dilution isotopique pose dans la détermination de la valeur A la principale difficulté technique. Il semble que la meilleure solution soit de localiser la fumure, de manière à limiter au maximum la diffusion du phosphore de l'engrais (RENNIE et SPRATT, 1962).

On doit donc obtenir, dans des sols très pauvres en phosphore, des valeurs A presque nulles (la plante s'alimentant, dans ce cas, essentiellement aux dépens de l'engrais). Dans des sols de richesse quelconque, il est alors possible de déterminer la part des deux sources, réserves du sol et fumure localisée, dans l'alimentation de la plante. Enfin, la comparaison des valeurs L et A permet de mieux distinguer les facteurs de l'assimilabilité des réserves.

RENNIE et SPRATT (1962) ont montré que les valeurs A déterminées au champ étaient en bonne corrélation inverse avec la réaction des cultures à la fumure phosphatée. Par contre, les valeurs A déterminées en vases de végétation reflètent mal la réaction aux engrais, car elles font abstraction des caractères du profil, du régime hydrique...

En déterminant à la fois, sur divers sols, les valeurs L, les valeurs A au champ et les valeurs A en vases de végétation, nous avons tenté de mieux comprendre les facteurs de l'utilisation par la plante des réserves phosphoriques du sol et d'une fumure phosphatée localisée, notamment dans des sols de rendzines très peu profonds et caillouteux.

TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

Celles-ci ayant été assez délicates, nous les décrirons de façon un peu détaillée.

a) *Sols étudiés*

Ces sols appartiennent principalement aux divers types constituant la Champagne Berrichonne, précédemment décrits (BLANCHET, 1961) : rendzines caillouteuses, et sols bruns sur dépôts argilo-limoneux. En outre, un sol sablo-limoneux et hydromorphe, formé sur placages tertiaires (MAERTENS, 1964) a été étudié à titre comparatif.

Ces sols présentent entre eux de grandes différences, d'une part dans le niveau de leurs réserves phosphoriques, d'autre part dans leur profondeur et leur teneur en cailloux, c'est-à-dire dans la quantité de terre fine exploitable par les racines. Le tableau 1 résume les principaux caractères des sols ; neuf points d'étude avaient été implantés, mais l'un d'eux, sur rendzine, a été abandonné en raison d'un comportement aberrant probablement dû à sa situation ombragée.

En sols caillouteux, la densité apparente a été mesurée en enlevant la terre arable sur une surface de 0,5 m/0,5 m, et en mesurant le volume de cette excavation. Du poids de terre ainsi retirée, et de la quantité de cailloux présente dans l'échantillon, on déduit la densité apparente globale, la teneur en cailloux et le tonnage de terre fine par hectare.

Dans les sols de rendzines, la terre fine est relativement riche en phosphore, mais, en raison de la faible profondeur et de la forte teneur en cailloux, la quantité de P disponible par hectare n'est pas très élevée. La détermination des valeurs A est particulièrement utile pour mieux l'apprécier. Dans les terres plus profondes, les sous-sols sont dans tous les cas très pauvres en P. Les mesures se rapportant à la solution du sol ont été effectuées selon une technique précédemment décrite (BLANCHET et *al.*, 1963).

b) *Détermination des valeurs L*

Cette détermination a été effectuée selon la technique de LARSEN et COOKE (1961). Des échantillons de 400 g des sols et sous-sols mentionnés ci-dessus étaient additionnés de 600 g de quartz broyé, et 0,1 mc de $^{32}PO_4H_3$ sans entraîneur était mélangé très intimement à ce milieu, par l'intermédiaire de 50 g de sable très fin servant de support au phosphore radioactif. Des quantités largement suffisantes de tous les éléments nutritifs autres que P étaient en outre apportées.

Des cultures de ray-grass italien, soumises à des coupes successives, ont ensuite été effectuées, et la valeur L est déduite des teneurs en ^{31}P et ^{32}P de la matière sèche récoltée, lorsque le rapport $^{31}P/^{32}P$ demeure constant dans le temps :

$$L = \frac{^{31}P \text{ plante}}{^{32}P \text{ plante}} \times {}^{32}P \text{ introduit}$$

Ces valeurs L sont exprimées en mg P par kg de sol (ppm).

c) *Détermination des valeurs A au champ*

Les essais ont été effectués avec de l'orge de printemps, dans des parcelles de 5 m² (5 m de longueur, 1 m de largeur, soit 6 lignes de plants espacées de 17 cm). La fumure apportée était, en kg par ha, de 95 N, 60 K_2O et 50 P_2O_5 ; l'engrais phosphaté, préalablement marqué par ^{32}P, était

TABLEAU I

Principaux caractères des sols étudiés

Sol nº	1	2	3	4	5	6	7	8
Type de sol	Sol brun profond	Rendzine	Rendzine	Rendzine	Rendzine	Sol brun profond	Sol brun	Limono-sableux hydromorphe
Caractères								
Couche arable								
Profondeur (cm)	30	18,5	18	17,5	17	33	25	26
Densité apparente globale (terre fine + cailloux)	1,35	1,27	1,02	1,00	0,97	1,51	1,31	1,52
Cailloux (g/kg de terre)	0	350	310	370	440	17	10	0
Terre fine (tonnes/ha)	4 050	1 350	1 270	1 100	925	4 900	3 250	3 960
Terre fine, composition								
Argile (%)	28,8	38,8	51,8	41,3	51,5	25,8	33	15,5
Matière organique (%)	2,38	4,37	4,28	4,24	4,50	1,95	3,77	1,81
Calcaire (%)	0	12,8	3,6	12,1	6,5	0	tr.	0
pH	6,85	—	—	—	—	7,4	7,7	8,2
P_2O_5 assimilable, (‰) (JORET-HÉBERT)	0,16	0,30	0,21	0,17	0,28	0,07	0,06	0,07
(P solution du sol mg/l)								
Apport 0	0,16	0,25	0,21	0,10	0,20	0,08	tr.	0,07
Apport 20 ppm P	0,58	0,72	0,45	0,25	0,55	0,30	0,27	0,5
Apport 40 ppm P	1,57	1,4	0,75	0,50	0,77	1,19	0,75	1,9
Sous-sol								
Argile (%)	44,8					37,5	56,8	16,3
P_2O_5 assimilable (‰)	0,04	Cailloux calcaires	Cailloux calcaires	Cailloux calcaires	Cailloux calcaires	0,03	0,01	0,02
P solution sol (mg/l)								
Apport 0	0,03					0,01	0,03	0,02
Apport 20 ppm	0,07					0,06	0,05	0,13
Apport 40 ppm	0,17					0,22	0,13	0,20

localisé sous les lignes de semis. A cet effet, la dose d'engrais phosphaté nécessaire a été calculée et préparée pour chaque ligne de semis, et représentait 6,75 g $PO_4H_2NH_4$ par ligne. Cette dose était divisée en deux parties :

— 6 g $PO_4H_2NH_4$ étaient mélangés très intimement à 100 g de terre fine sableuse ;

— 0,75 g $PO_4H_2NH_4$ étaient dissous dans 10 ml d'eau, et on ajoutait à cette solution 0,33 mc. $^{32}PO_4H_3$ sans entraîneur. Puis ce liquide était soigneusement incorporé et mélangé aux 100 g de terre précités, contenant déjà la plus grande partie de l'engrais. L'ensemble était enfin séché et finement broyé.

Des raies de 7 à 8 cm de profondeur étaient alors tracées à l'emplacement des lignes de semis, et le mélange terre sableuse + engrais marqué était saupoudré dans cette rigole. Celle-ci était ensuite partiellement comblée, de manière à laisser une profondeur de 3 à 4 cm, où les graines d'orge étaient disposées, puis recouvertes.

Une autre parcelle de 5 m² était traitée de façon exactement identique, mais ne recevait pas de ^{32}P, de manière à examiner à la récolte le développement des systèmes radiculaires. L'ensemble était entouré d'un grillage solide, de manière à éviter l'introduction de gibier, prédateurs... Afin de pouvoir doser avec une précision suffisante la radioactivité absorbée par les plantes, la récolte a été effectuée après l'épiaison, ce qui représentait une durée de végétation de deux mois et demi.

d) *Détermination des valeurs A en pots*

Les conditions réalisées ici ont été aussi proches que possible de celles du champ, sauf en ce qui concerne la quantité de terre fine exploitable par les racines, qui était uniformément de 9 kg par vase (dans les sols caillouteux, la terre fine était seule conservée). Chaque pot portait 9 plants d'orge, ce qui correspond sensiblement à la densité de 250 plants par m² réalisée au champ ; ces plants étaient disposés le long d'un diamètre du vase, au-dessus de la bande du même engrais phosphaté localisé.

Les meilleures conditions de température et d'alimentation en eau qui règnent sous abri permettent habituellement d'escompter, par unité de surface ou de poids de sol, des productions de matière sèche plus élevées qu'au champ. Afin de respecter autant que possible le même rapport entre les besoins des plantes et les réserves nutritives des sols, les doses d'engrais apportées ont été doublées, et correspondaient ainsi à 100 kg P_2O_5/ha, soit 300 mg P_2O_5 par vase, de même radioactivité spécifique qu'au champ.

Le semis et la récolte ont été effectués aux mêmes dates, et les stades végétatifs sont demeurés comparables.

La valeur A est calculée de la manière suivante (FRIED et DEAN, 1952). Soient les deux sources alimentaires A et B :

A = P utilisable du sol ;

B = étalon de comparaison, c'est-à-dire fumure ajoutée, caractérisée par la quantité d'engrais et l'assimilabilité de celui-ci.

On se propose d'étalonner le pouvoir alimentaire du sol par rapport à celui de la fumure apportée et ainsi de comparer les sols entre eux, d'une part au champ selon les caractères du profil, d'autre part en vases de végétation sur leur terre fine. Si la fumure est bien restée dans la zone de localisation, et n'a pas diffusé dans l'ensemble du sol, nous avons pour chaque cas la relation :

$$\frac{\text{A sol}}{\text{B sol}} = \frac{\text{A plante}}{\text{B plante}},$$

or : P total absorbé = A plante + B plante.

Proportion y de P absorbé provenant de l'engrais :

$$y = \frac{\text{B plante}}{\text{A plante} + \text{B plante}},$$

on en déduit :

$$\text{A sol} = \text{B sol} \times \frac{\text{A plante}}{\text{B plante}} = \text{Fumure} \times \frac{1 - y}{y}.$$

En fait, le terme y correspond au rapport de la radioactivité spécifique de la plante à la radioactivité spécifique de l'engrais.

La valeur A obtenue, qui exprime l'efficacité alimentaire des réserves du sol, est exprimée en kg P_2O_5/ha de la forme localisée d'engrais phosphaté utilisé.

RÉSULTATS

a) *Essais en vases de végétation*

Le tableau 2 indique les principaux résultats obtenus au cours de la détermination des valeurs L, et des valeurs A en vases de végétation. Celles-ci ont été exprimées de deux manières différentes :

— d'une part, pour les comparer aux valeurs A obtenues en plein champ, en multipliant le rapport $\frac{1-y}{y}$ par la fumure exprimée en kg/ha P_2O_5 (100 kg) : colonne 8 ;

— d'autre part, pour faciliter la comparaison aux valeurs L, en multipliant le même rapport par la quantité de P effectivement introduite dans le vase de végétation (130 mg P) : colonne 9.

L'ensemble de ces résultats met en évidence les principaux points suivants :

1° *Les quatre sous-sols :*

Ils se sont avérés très pauvres, que l'on considère les quantités de P absorbées par les plantes dans les essais L, ou les valeurs A. Sur ces sous-sols, l'alimentation des plantes a naturellement été meilleure dans la série A que dans la série L (colonnes 2 et 4), car les essais A avaient reçu une fumure phosphatée couvrant les besoins de la culture (130 mg P). Cette fumure n'a été que très partiellement utilisée (colonne 4) ; cependant, la part de P absorbé provenant de l'engrais a été nettement plus importante dans ces sous-sols que dans les couches arables correspondantes, puisque les teneurs des plantes en ^{32}P sont beaucoup plus élevées (colonne 6).

Malgré la pauvreté de ces sous-sols, la fumure n'a pas diffusé vers l'ensemble du vase, comme en témoignent les très faibles valeurs A obtenues. Dans les conditions expérimentales réalisées, cette détermination de valeurs A s'avère donc valable.

2° *La comparaison des valeurs A et L.*

Lorsqu'elles sont exprimées dans les mêmes unités (colonnes 1, 9 et 10), montre que ces deux grandeurs sont voisines dans les sols les plus riches (échantillons n°s 2, 5). L'ensemble des réserves du sol possède dans ce cas une efficacité alimentaire peu éloignée de celle du phosphate monoammonique localisé selon les conditions de l'expérience.

b) *Essais en plein champ*

Les résultats obtenus sont indiqués par le tableau 3. La végétation s'étant effectuée au cours d'une période assez sèche, les récoltes ont été influencées par les réserves hydriques de ces sols, liées à la nature du profil.

Le pédoclimat qui a régné au cours de cette expérience est toutefois assez représentatif des conditions générales des sols étudiés : ces rendzines, qui ne possèdent

TABLEAU 2

Résultats des essais en vases de végétation

Sol n°	Essais L		Essais A							Rapport A/L
	Val. L, (mg P par kg de sol)	P absorbé en 3 coupes, (mg par kg de sol)	Matière sèche (g/vase) 2	P absorbé mg/vase	^{31}P (‰ de M.S.)	^{32}P par g. M.S. (indice comparatif)	y	Valeur A		
								kg P_2O_5/ha	mgP/kg de sol	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 (sol)	174	46	38	86,5	2,28	1,22	0,096	940	136	0,78
1 (sous-sol)	62	1,8	28,1	38,8	1,38	5,72	0,75	33	4,8	0,08
2 (sol)	222	49	45,8	114	2,5	0,87	0,063	1 490	216	0,97
3 (sol)	268	58	51,1	120	2,35	1,10	0,085	1 080	156	0,58
4 (sol)	165	37	41,6	79	1,90	1,76	0,167	493	71	0,43
5 (sol)	206	48	49,1	115	2,34	1,05	0,081	1 130	163	0,79
6 (sol)	75	9,5	39,1	61	1,56	3,28	0,38	163	24	0,32
6 (sous-sol)	44	3	35,9	39,5	1,10	4,60	0,755	33	4,8	0,11
7 (sol)	69	5,3	48,2	53	1,10	2,76	0,45	122	18	0,26
7 (sous-sol)	34	1,5	41	36,5	0,89	4,80	0,98	2	0,3	0,09
8 (sol)	59	7,7	36	32,5	0,90	1,88	0,38	163	24	0,48
8 (sous-sol)	38	0,8	36,8	33	0,90	4,65	0,94	6	0,9	0,02

qu'une faible quantité de terre fine par hectare, peuvent être considérées comme des milienx particulièrement secs.

De même qu'en vases de végétation, on constate que, sur les sols les plus pauvres (nos 6, 7, 8), les teneurs des plantes en ^{32}P sont notablement plus élevées, indiquant une utilisation plus importante de l'engrais marqué.

Les valeurs A ont été exprimées d'une part en kg/ha de P_2O_5 du phosphate monoammonique localisé, et d'autre part ramenées en kg de P_2O_5 du même engrais pour 1 000 tonnes de terre fine. Si l'on considère le premier mode d'expression (kg/ha P_2O_5), deux remarques apparaissent aussitôt (tabl. 3, col. 7) :

TABLEAU 3

Résultats des essais en plein champ

Sol n°	Terre fine t/ha	Mat. sèche produite kg/5 m²	^{31}P °/oo M.S.	^{32}P par g M. S. (ind. comp.)	Valeurs A		Rapport A champ/A pots (kg P_2O_5/ha)	P_2O_5 assim. °/oo
					kg/ha P_2O_5	kg P_2O_5 pour 1 000t. terre fine		
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4 040	3,08	2,56	0,62	1 085	270	1,15	0,16
2	1 530	2,44	2,38	0,86	720	470	0,48	0,30
3	1 270	2,9	2,7	1,15	600	470	0,56	0,21
4	1 100	2,1	2,3	1,38	413	375	0,84	0,17
5	925	1,65	2,4	1,57	373	405	0,33	0,28
6	4 900	3,24	2,58	1,77	356	73	2,18	0,07
7	3 250	1,81	1,95	4,1	82	25	0,67	0,06
8	3 960	4,18	2,18	2,41	200	50	1,22	0,07

1° Dans les trois sols profonds, nos 1, 6 et 8, les valeurs A exprimées par hectare sont plus élevées au champ qu'en vase de végétation, la profondeur de terre arable utilisable par les racines étant plus grande (20 cm en pot, parfois plus de 30 cm au champ).

Le phénomène inverse se produit sur les rendzines caillouteuses (nos 2 à 5), où les plantes ne disposaient au champ que d'un faible volume de terre.

2° On constate également que les teneurs en P_2O_5 assimilable, mesurées selon la technique de JORET et HÉBERT (1955) sont surtout liées aux valeurs A exprimées par tonne de terre fine (quoique la relation ne soit pas très étroite). Ces deux caractères reflètent en effet l'ampleur des réserves phosphoriques par unité de poids de sol, les valeurs A permettant d'ailleurs de mieux tenir compte de leur disponibilité.

La relation est par contre très faible entre les teneurs en P_2O_5 assimilable et les valeurs A exprimées par hectare, c'est-à-dire compte tenu de la quantité de terre exploitable par les racines. Le volume de sol mis à la disposition des cultures apparaît ainsi un critère aussi important que la teneur en P assimilable.

Conformément au principe de la mesure, ces valeurs A permettent bien de tenir compte de l'ensemble des facteurs de l'alimentation phosphorique des plantes.

DISCUSSION

a) *Validité de ces essais*

Ceux-ci mettent en œuvre des techniques assez délicates, et qui peuvent parfois paraître critiquables, notamment sous deux aspects :

— principe de la détermination des valeurs A ;

— rapprochement d'essais effectués au champ et en vases de végétation.

1° *Principe de la détermination des valeurs A.*

Nous avons déjà signalé ci-dessus que les valeurs A obtenues en vases de végétation sur les échantillons de sous-sols très pauvres en P étaient extrêmement faibles, ce qui indique que l'engrais radioactif localisé n'a pas diffusé vers l'ensemble du sol. Cette condition est primordiale dans l'application de cette technique, puisqu'il s'agit de mesurer le pouvoir alimentaire du sol par rapport au « standard » que représente l'engrais radioactif.

Bien que les mouvements d'eau aient été assez importants dans ces essais en pots, ramenés chaque jour au voisinage de l'humidité équivalente, les diffusions d'ions PO_4 n'ont donc pas constitué un facteur de perturbation. Ce fait ne nous paraît d'ailleurs pas surprenant, compte tenu de la très faible amplitude des mouvements d'ions phosphoriques, observée par ailleurs (BLANCHET et CHAUMONT, 1964). Au champ, les mouvements d'eau étaient beaucoup plus réduits, et les migrations de P n'ont pu être que plus faibles encore.

On peut remarquer par ailleurs que les valeurs A, et les quantités de P absorbées par les plantes au cours des essais L, sont en très bonne concordance quant au classement des échantillons les uns par rapport aux autres (tabl. 2, col. 2 et 9). Les valeurs A indiquent donc bien la disponibilité des réserves du sol.

La validité de la technique de détermination de ces valeurs A ne nous paraît ainsi pas devoir être contestée.

2° *Rapprochement d'essais effectués au champ et en vases de végétation.*

C'est en comparant ces deux séries de résultats que nous pouvons dégager l'influence du volume de terre exploitée par les racines, mais on peut se demander si le rapprochement est logique.

Le tableau 4 met en comparaison les trois groupes de valeurs : L ; A au champ, exprimée en mg P par kg de terre fine ; A en pot, calculée d'après la dose de P effectivement apportée dans chaque vase, et exprimée selon les mêmes unités. Bien que les deux déterminations de valeurs A soient ainsi indépendantes, les résultats obtenus, c'est-à-dire les deux mesures de l'efficacité alimentaire des réserves du sol par comparaison à un même engrais, sont en assez bonne concordance. Un écart important n'apparaît guère que sur le sol n° 4, où, au champ, la levée de l'orge avait été défectueuse ; la faible densité de plantes a probablement entraîné une surestimation de la valeur A.

De même que la fumure et la production d'organes aériens, le développement des systèmes radiculaires a été environ deux fois plus important en pots qu'au champ :

1 dm³ de sol renfermait de l'ordre de 1 g de racines (matière sèche) dans les vases de végétation, et 0,5 g en plein champ. La bande d'engrais localisé occasionnait généralement, dans les deux cas, une prolifération de racines.

Le respect des proportions entre les besoins des plantes et la fumure permet ainsi de comparer valablement les deux séries de résultats. Notons d'ailleurs que selon RENNIE et SPRATT (1962), la valeur A varie peu lorsque l'on modifie la dose d'engrais apportée.

TABLEAU 4

Comparaison des deux séries de valeurs A, valeurs L et solutions du sol

Sol n°	Val. A champ (mg P/kg terre fine)	Val. A pot (mg P/kg terre fine)	Val. L (mg P/kg terre fine)	Solution du sol (mg P/litre)
7	11	18	69	traces
8	22	24	50	0,07
6	32	24	75	0,08
1	118	136	174	0,16
4	162	71	165	0,10
5	175	163	206	0,20
3	204	156	268	0,21
2	204	216	222	0,25

b) *Influence du volume de sol exploitable par les racines*

Le graphique 1 représente, en fonction des quantités de terre fine présentes dans la couche arable des divers champs d'essais, les rapports : $\frac{\text{Valeurs A au champ}}{\text{Valeurs A en pots}}$.

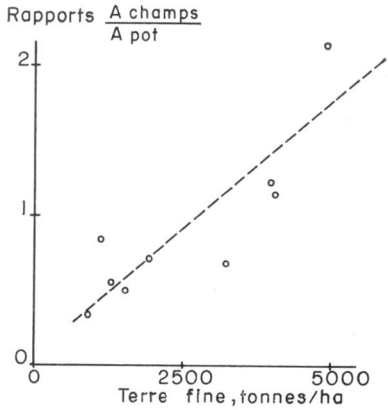


FIG. 1. — *Rapports* $\frac{\text{valeurs A au champ}}{\text{valeurs A en pots}}$, *en fonction des quantités de terre fine par hectare*

Une relation assez bien définie s'en dégage : dans les sols en place les moins profonds et les plus caillouteux, la valeur « A » n'atteint que 40 p. 100 de celle que l'on observe en vase de végétation, et le rapport croît au fur et à mesure que la quantité de terre

fine augmente. D'après le comportement général, ce rapport serait de l'ordre de 1 lorsque le poids de terre est de 3 000 tonnes/ha, ce qui représente une épaisseur de 20 cm, correspondant à celle qui était réalisée dans les pots.

L'ampleur des réserves du sol doit donc être appréciée non seulement d'après la teneur en P assimilable et les autres caractères de potentiel, mobilité des ions PO_4..., mais également d'après la quantité de terre exploitable par les racines, qui représente un facteur tout aussi important.

Cet aspect se manifeste d'ailleurs sur l'épuisement du sol par une culture. Ainsi, les plantes ont prélevé dans les réserves des sols n°s 1, 3 et 6, au champ, des quantités de P très voisines ; il en résulte les appauvrissements suivants de la terre fine :

P prélevé à partir des réserves du sol	n° 6	n° 1	n°3
g/5 m²	7,3	7,5	7,2
Terre fine, tonnes/ha	4 900	4 040	1 270
P prélevé, mg par kg de terre fine (p.p.m.)	3	3,7	11,3

Dans les sols peu profonds et caillouteux, l'épuisement des réserves par les cultures se fait donc sentir très rapidement, et il convient de veiller tout particulièrement à ce que les fumures soient bien appropriées aux besoins de la récolte.

c) *Influence du potentiel électrochimique des ions phosphoriques dans le sol*

Il semble maintenant reconnu, par la plupart des auteurs, que la *quantité* de réserves nutritives d'un sol ne suffise pas à bien caractériser ces réserves et qu'il faille considérer également un terme de *potentiel* ou d'activité des ions PO_4 (BLANCHET

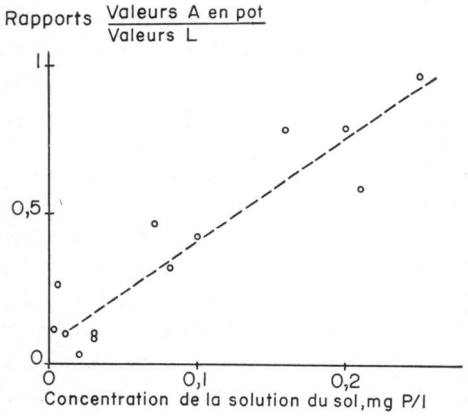


FIG. 2. — *Rapports* $\frac{\text{valeurs A en pots}}{\text{valeurs L}}$, *en fonction de la concentration en P des solutions du sol*

1959). La comparaison des valeurs A et L fournit une illustration de ces phénomènes: la valeur L est purement un terme de quantité, et la valeur A exprime directement l'efficacité alimentaire des ions PO^4.

Sur le graphique 2, les rapports :

$$\frac{\text{valeurs A en pots}}{\text{valeurs L}},$$

c'est-à-dire

$$\frac{\text{efficacité alimentaire}}{\text{quantité de réserves}},$$

sont représentés en fonction de la concentration en P des solutions du sol. On constate immédiatement que ce rapport est sensiblement proportionnel à la concentration de la solution du sol, qui exprime le potentiel électrochimique des ions PO_4.

L'efficacité alimentaire des réserves phosphoriques est donc bien une fonction de l'activité des ions PO_4 dans le système sol-solution ; elle dépend ainsi du pouvoir adsorbant du sol. Le tableau 4, où sont rapprochées les deux séries de valeurs A, les valeurs L, et les concentrations des solutions du sol, fait apparaître les mêmes conclusions.

d) *Alimentation des plantes à partir des réserves du sol et à partir de l'engrais localisé*

De la teneur des plantes en ^{32}P, il est facile de déduire la quantité de phosphore absorbée provenant de l'engrais. Cette fraction du P absorbé doit en effet présenter la même radioactivité spécifique que celle de l'engrais, puisqu'il n'y a pas eu de diffusion appréciable de ^{32}P vers l'ensemble du sol. Même si ce calcul n'est pas rigoureusement exact, il semble fournir une image assez valable des phénomènes réels. Connaissant la quantité totale de P absorbé, on obtient, par différence, celle qui provient des réserves du sol.

Le tableau 5 indique l'ensemble des résultats obtenus ; il s'en dégage les remarques suivantes :

1° *Au champ, la plante s'est alimentée principalement aux dépens des réserves du sol* (comparaison des colonnes 1 et 3). Dans les sols relativement riches, la proportion du P total de la plante provenant de l'engrais localisé est de l'ordre de 5 à 10 p. 100. Cette proportion augmente en sols pauvres, selon l'effet bien connu de la localisation : elle atteint 20 p. 100 dans le sol n° 8, et 40 p. 100 dans le sol n° 7. En même temps, le degré d'utilisation de la fumure augmente (col. 4).

Ces résultats ont été obtenus en présence d'une fumure localisée à faible profondeur, et dans une période assez sèche. On ne peut naturellement pas les extrapoler au cas d'une fumure enfouie par un labour ou d'autres façons culturales. Néanmoins, l'importance d'un bon niveau de réserves du sol apparaît très nettement.

2° *Sur les sous-sols très pauvres en phosphore, en vases de végétation, le P absorbé provient essentiellement de la fumure* (sous-sols n°s 1, 6, 7 et 8), alors que les échantillons de surface présentent un comportement voisin de celui qui a été observé au champ. La localisation a donc permis d'assurer une alimentation appréciable dans ces sous-sols très pauvres, quoique les quantités totales de P absorbées, et le degré d'utilisation de la fumure, restent assez faibles. La localisation représente ainsi dans de tels cas un palliatif appréciable, mais ne semble pas dispenser d'envisager la constitution de réserves normales dans l'ensemble du sol, si l'on se propose d'obtenir des rendements élevés.

TABLEAU 5

Quantités de phosphore absorbées par les plantes à partir du sol et à partir de l'engrais localisé

Sol nº	Au champ				En vase de végétation			
	P provenant du sol		P provenant de l'engrais		P provenant du sol		P provenant de l'engrais	
	kg/ha P	ppm de sol	kg/ha P	% de l'apport	mg P par vase	ppm de sol	mg P par vase	% de l'apport
1 (sol)	15	3,7	0,72	3,3	78	8,7	8,5	6,5
1 (sous-sol)					9,7	1,1	29,1	22,3
2 (sol)	10,8	7,1	0,76	3,5	107	11,9	7	5,4
3 (sol)	14,4	11,3	1,20	5.5	110	12,2	10	7,7
4 (sol)	8,6	7,8	1,06	4,9	65	7,2	14	10,8
5 (sol)	7	7,6	0,98	4,3	106	11,8	9	6,9
6 (sol)	14,6	3	2,10	9,6	38	4,2	23	17,7
6 (sous-sol)					9,7	1,1	29,8	22,8
7 (sol)	4,4	1,4	2,70	12,4	29	3,2	24	18,4
7 (sous-sol)					0,7	0,1	35,8	27,4
8 (sol)	14,5	3,7	3,66	16,8	20,2	2,3	12,3	9,5
8 (sous-sol)					2	0,2	31	23,8

CONCLUSIONS

L'étude détaillée de l'alimentation phosphorique des plantes dans le sol au moyen de la détermination de la valeur A nous paraît présenter un incontestable intérêt. En complément de l'expérimentation classique, cette méthode présente l'avantage de pouvoir comparer facilement entre eux divers sols, par rapport à un même « étalon » constitué par l'engrais radioactif. En outre, elle permet de distinguer beaucoup plus facilement l'influence des divers facteurs de l'alimentation.

Parmi d'autres caractères, le choix et le mode de disposition de l'engrais marqué sont importants du point de vue expérimental. Dans ces essais, nous avons simplement introduit dans un engrais phosphaté soluble une petite quantité de ^{32}P, mais d'autres modalités de préparation peuvent être réalisées, et l'application de l'engrais peut être faite différemment (FRIED, 1954).

Cette technique est relativement délicate à mettre en œuvre, car elle fait intervenir les divers facteurs qui peuvent influencer le développement des systèmes radiculaires : fumure azotée, régime hydrique... (RENNIE et SPRATT, 1962). Il importe donc de se placer dans les conditions les plus proches possible de celles qui interviennent dans les cultures habituelles, puisque cette méthode intègre, en quelque sorte, les différents facteurs de l'alimentation.

Son application nous paraît surtout utile lorsqu'il est difficile d'apprécier le niveau phosphorique à l'aide des tests classiques, notamment dans les sols présentant des particularités physiques ou chimiques : terres caillouteuses comme dans le problème étudié ici, ou au contraire particulièrement profondes et riches en P ; cas de pouvoirs adsorbants très faibles, ou très élevés (sols tropicaux...). L'application au champ revêt alors beaucoup plus d'intérêt que la réalisation en vases de végétation.

De manière générale, les valeurs A que nous avons obtenues représentent un stock assez important de phosphore disponible, quoique les sols les mieux pourvus ne puissent guère être considérés que comme à la limite de réaction aux apports d'engrais phosphatés. Sauf en présence de fumures localisées, qui présentent en sols pauvres un intérêt manifeste, les cultures n'exploitent donc réellement qu'une faible fraction des réserves phosphoriques, très probablement celles qui se trouvent au voisinage immédiat de leurs racines (BLANCHET et CHAUMONT, 1964).

La comparaison des valeurs A et L met d'autre part en évidence l'influence du potentiel des ions PO_4 dans le sol sur leur disponibilité à l'égard des plantes. Ces divers aspects montrent l'intérêt, pour l'obtention de rendements élevés, de l'entretien soigneux ou de l'amélioration du niveau phosphorique de l'ensemble du sol, pratiques qui peuvent d'ailleurs être combinées aux effets de localisation.

Reçu pour publication en juin 1965.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à exprimer nos remerciements au Commissariat à l'Énergie atomique, qui a bien voulu faciliter la réalisation de ces essais, ainsi qu'aux agriculteurs du Centre d'Études Techniques Agricoles d'Issoudun qui ont accepté de mettre à notre disposition les parcelles expérimentales nécessaires.

SUMMARY

SOME EXAMPLES OF THE POSSIBLE USE OF A RADIOACTIVE PHOSPHATE FERTILIZER IN THE STUDY OF THE NUTRIENT CAPACITY OF SOILS

The nutrient capacity of various soils, especially of shallow and flinty rendzinas, was studied by means of placement of a radioactive phosphate fertilizer, utilizing the technique of « A values » developed by FRIEND and DEAN (1952). The experiments were conducted both in the field and in pots ; in the latter case, soils and subsoils were used in the experiments. The L values (LARSEN, 1952) were also determined.

Main results were the following.

The A values obtained in the experiments were rather variable, and agreed well with the amounts of phosphorus absorbed by plants under different conditions.

The A values expressed as Kg/Ha phosphorus give good information on the nutrient capacity of soil, which depends on the amount of available P in soil and on that of fine soil in the arable layer. The A values obtained in pot experiments agree well with the levels of available P determined by chemical methods ; available P determined by chemical methods shows little relationship with A values in the field if the soil profile possesses particular properties. The determination of A values in the field is, thus, useful where classical methods do not yield good enough values for estimating the level of phosphorus reserves in soil.

Comparison of A and L values show the role of the electrochemical potential of PO_4 ions in respect of their availability to plants.

The nutrition of plants from the phosphorus reserves of soil on the one hand, and from placed phosphate fertilizer on the other, is studied and discussed.

ZUSAMMENFASSUNG

EINIGE BEISPIELE DER VERWENDUNG EINES RADIOAKTIVEN PHOPHORDÜNGERS ZUM STUDIUM DES ERNÄHRUNGSVERMÖGENS DER BÖDEN

Das Studium des Ernährungsvermögens verschiedener Böden, insbesonders sehr wenig tiefer und schottriger Rendsine, wurde mittels radioaktivem, lokalisiertem Phosphordünger nach der von FRIED und DEAN (1952) empfohlenen Technik der « A-Werte » ausgeführt. Die Versuche fanden zugleich auf dem Felde und in Vegetationsgefässen statt ; in letzterem Falle wurden Böden und Untergrund im Versuch aufgenommen. Desgleichen wurden die L-Werte (LARSEN, 1952) bestimmt

Die wichtigsten Resultate waren folgende :

— Die A-Werte scheinen Gültigkeit zu besitzen und sind im Einklang mit den Phosphormengen, die durch die Pflanzen unter andern Bedingungen aufgenommen wurden.

— In Kg/Ha P ausgedrückt, ergibt sich ein besseres Bild des Ernährungsvermögens des Bodens, der zugleich vom Gehalt assimilierbaren Phosphors und der im Boden enthaltenen Menge Feinerde abhängt. Die A-Werte der Vegetationsgefässe stehen in ziemlich gutem Einklang mit den assimilierbaren P-Gehalten, die auf chemische Weise gemessen wurden ; diese haben wenig Beziehung mit den A-Werten im Felde, wenn das Bodenprofil besondere Charakteristika aufweist. Die Bestimmung der A-Werte im Felde erweist sich also sehr nützlich, wenn man mittels der klassischen Teste die Höhe der Phosphorreserven nicht gut schätzen kann.

Der Vergleich der A- und L-Werte veranschaulicht die Rolle des elektrochemischen Potentials der PO_4-Ionen in ihrer Verfügung für die Pflanzen.

Endlich wird die Pflanzenernährung, ausgehend von den P-Reserven des Bodens einerseits, vom lokalisierten P-Dünger andrerseits, einer Prüfung und Diskussion unterzogen.

НЕСКОЛЬКО ПРИМЕРОВ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО ФОСФОРНОГО УДОБРЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПОЧВ.

Р. Бланшэ, Ж. Моризэ, Колетта Шомон, К. Маэртенс.

РЕЗЮМЕ

Изучение питательной способности разных почв, в частности мало мощных и каменистых рендзинов. было проведено при помощи локально внесенного радиоактивного фосфорного удобрения, техническим методом « значений А» Фрида и Дина (1952).

Реализованы были полевые опыты и вегетационные опыты в сосудах; в последнем случае подвергались эксперименту как почва, так и подпочва. Выведены были так же и значения ℓ (Ларсен 1952).

Основные результаты сводятся к следующему :

— Значения А полученные после применения указанной техники — допустимы и находятся в соответствии с количествами фосфора поглощенного растениями поставленными в иные условия.

— Выражение этих значений в кг фосфора/га отдает лучше отчет о питательной способности почвы, зависящей в одно и то-же время и от содержания в почве доступного фосфора, и от количества мелкозема в пахотном слое.

Значения А ролученные в опытах с вегетационными сосудами соответствуют содержанию доступного фосфора найденного химическим путем; они плохо согласуются со значениями А полевых опытов в случаях когда профиль почвы представляет характерные особенности. Поэтому, если классические тесты не дают возможности оценить уровень запасов фосфора, выведение полевых значений А играет важную роль.

— Сравнение значений А и ℓ иллюстрирует роль электрохимического потенциала ионов PO_4 в отношении их доступности для растений.

И, наконец, авторы разсматривают и обсуждают фосфорное питание растений получающих этот элемент, с одной стороны, из запасов фосфора почв, и с другой из локализованного фосфорного удобрения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIER G., LESAINT M., TYSZKIEWICZ E., 1954. Recherches au moyen d'isotopes sur les phénomènes d'autodiffusion dans le sol et sur l'alimentation des plantes. *Ann. agron.*, **5**, 923-959.

BLANCHET R., 1959. Nutrition minérale des plantes, activités ioniques et énergies d'adsorption. *Ann. agron.*, **10**, 267-307.

BLANCHET R., 1961. Les sols et les problèmes agronomiques de Champagne berrichonne. *Bull. Ass. franc. Ét. Sol.*, **3**, 115-120.

BLANCHET R., CHAUMONT C., PÉRIGAUD S., 1961. Influence de l'ampleur et de la disponibilité des réserves minérales des sols sur la vitesse d'utilisation de ces réserves par les plantes. *C. R. Acad. Sci. Fr.*, **252**, 2597-2599.

BLANCHET R., STUDER R., CHAUMONT C., 1963. Appréciation détaillée du niveau phosphorique des sols par des techniques simples. *C. R. Acad. Agric.*, **49**, 256-263.

BLANCHET R., CHAUMONT C., 1964. Quelques aspects de la désorption et des mouvements d'ions phosphoriques dans le sol, et de leur participation à l'alimentation des plantes. *Ann. agron.*, **15**, 519-538.

FRIED M., DEAN L. A., 1952. A concept concerning the measurement of available soil nutrients. *Soil Sci.*, **73**, 263-272.

FRIED M., 1962. Discussion on this subject, in *Radioisotopes in soil-plant nutrition studies*. International Atomic Energy Agency, Vienne, 351.

FRIED M., 1964. Quantitative evaluation of processed and natural phosphates. *Agric. and Food Chem.*, **2**, 241-244.

JORET G., HÉBERT J., 1955. Contribution à la détermination du besoin des sols en acide phosphorique. *Ann. agron.*, **6**, 233-300.

LARSEN S., 1952. The use of P^{32} in studies on the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil*, **4**, 1-10.

LARSEN S., COOKE I. J., 1961. The influence of radioactive phosphate level on the absorption of phosphate by plants and on the determination of labile soil phosphate. *Plant and Soil*, **14**, 43-48.

MAERTENS C., 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement radiculaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Science du Sol*, **2**, 31-41.

RENNIE D. A., SPRATT E. D., 1962. Factors affecting and the significiance of « A » values using band placement, in *Radioisotopes in soil-plant nutrition studies*. International Atomic Energy Agency, Vienne, 329-342.

Ann. agron., 1965, **16** (5), 553-577.

ACTION D'UNE CULTURE D'ENGRAIS VERT SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES D'UN SOL DE VERGER

G. MONNIER et R. GRAS

avec la collaboration technique de C. JEANDET et J. OUDARD

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

A la suite d'un enfouissement de ray-grass d'Italie cultivé comme engrais vert d'hiver, on constate une amélioration significative mais fugace des propriétés physiques d'un sol de limon : stabilité structurale, perméabilité. La matière organique enfouie se minéralise rapidement, les parties aériennes précédant les racines.

INTRODUCTION

Les engrais verts sont des cultures installées dans le but de fournir de la matière végétale qui sera enfouie dans le sol par un labour ou par une façon culturale plus superficielle.

Les mécanismes invoqués pour expliquer les variations de rendement qui peuvent résulter de l'utilisation de cette technique culturale sont très divers :

— les engrais verts peuvent, pendant leur végétation, protéger le sol contre l'impact des gouttes de pluie limitant ainsi la battance ;

— à cette action de protection au-dessus du niveau du sol, peut s'ajouter l'action mécanique des racines assurant un rôle de maintien, voire d'affinement de la structure ;

— de nombreux auteurs ont souligné l'influence possible d'une culture d'engrais vert et de son enfouissement sur la dynamique des éléments fertilisants : limitation

du lessivage de l'azote, fourniture d'azote minéral au cours de la décomposition, assimilabilité accrue de l'acide phosphorique en sol calcaire ;

— enfin, il est assez fréquemment admis que l'enfouissement de l'engrais vert provoque un enrichissement en humus des couches superficielles du sol, cet humus étant susceptible, par des processus fort divers, d'améliorer le sol et, en particulier, ses propriétés physiques.

Dans le cas des engrais verts cultivés en association avec des arbres fruitiers, un certain nombre de différences apparaissent qui distinguent cette technique de la culture d'engrais vert « en dérobée » entre deux cultures de la rotation :

— dans le cas le plus général, les engrais verts installés dans les vergers ont une durée de végétation plus longue que les engrais verts de grande culture. Implantés au début de l'automne, ils ne sont enfouis qu'au début du printemps ;

— les espèces choisies sont souvent différentes : les graminées telles que le ray-grass d'Italie ou le seigle sont préférées aux légumineuses et aux crucifères. Or, pour les graminées, la part des racines dans la masse végétale produite est supérieure à ce qu'elle est pour les crucifères ou les légumineuses et plusieurs auteurs ont souligné l'importance de la fraction souterraine sur l'effet global observé (R. Benoit, N. Willits et *al.*, 1962) ;

— le mode d'enfouissement est également fort différent dans les vergers, la matière végétale n'y est plus enfouie par un labour de 20 cm ou plus, mais par des façons beaucoup plus superficielles n'intéressant qu'une dizaine de centimètres environ.

D'autre part, si les processus invoqués restent les mêmes pour expliquer l'action des engrais verts en cultures associées de verger, leur intérêt semble accru en raison des faibles restitutions organiques des cultures fruitières.

Dans le cas d'un verger conduit en sol nu, ces restitutions ne sont assurées que par les feuilles, les bois de taille et la végétation adventice qui peut commencer à se développer entre deux passages de l'outil qui assure l'entretien du sol. Il apparaît, dans ces conditions, qu'un apport supplémentaire de matière organique est nécessaire si l'on veut maintenir ou élever le taux d'humus du sol et l'on attend de l'engrais vert qu'il l'assure.

Par ailleurs, le sol nu d'un verger est fortement exposé aux actions de dégradation provoquées par la pluie et le passage des engins de traitement ou de récolte. C'est une raison supplémentaire pour que l'on cherche à le protéger au maximum. Dans cet ordre d'idée, la circulation est grandement facilitée par la présence de l'engrais vert en végétation, qui peut, de plus, dans les régions accidentées constituer un moyen de lutte contre l'érosion.

Enfin, si l'on conçoit que la diversité des actions que peut provoquer un engrais vert en général rende difficile l'interprétation d'expériences culturales où cette technique voit son efficacité établie uniquement à l'aide de comparaison de rendement, on doit admettre que le problème est encore compliqué sous verger où il y a, au cours de l'année, coexistence, donc risque de concurrence entre deux cultures installées sur le même terrain. Il devient encore plus indispensable, préalablement à tout jugement porté sur une telle technique, de procéder à un travail d'analyse destiné à mettre en évidence les modifications effectives des facteurs de fertilité consécutives à un enfouissement d'engrais vert.

Notre but a été ici de contribuer à cette analyse en nous attachant à dégager les conséquences d'une telle pratique sur l'évolution de la matière organique et sur les propriétés physiques du sol, en particulier sur la stabilité de sa structure.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET MÉTHODE D'ÉTUDE

Pour atteindre le but que nous venons de définir, nous avons utilisé un dispositif d'étude d'entretien du sol installé dans un verger et décrit par ailleurs (R. GRAS, 1965). L'influence des racines des arbres étant négligeable dans la couche superficielle et les apports dus aux feuilles faibles, on se trouve dans des conditions meilleures qu'en polyculture, où l'importance des résidus de récolte et l'installation d'une culture après l'engrais vert compliquent ou même rendent impossibles certaines opérations de cette étude.

1° *Localisation et sol*

Cet essai est installé en Brie, entre Provins et Nangis. Le sol contient 1,7 p. 100 de matière organique totale dont 25 p. 100 est sous forme libre. La texture est limoneuse :

argile	17,3 p. 100
limon 2-20 μ.....	33 —
limon 20-50 μ.....	43,1 —
sable fin 50-200 μ	3,3 —
sable grossier 200- 2000 μ.	1,6 —

La stabilité structurale est médiocre.

2° *Définition des traitements*

Témoin : sol nu travaillé avec enherbement spontané d'hiver. Le sol est maintenu propre pendant l'été à l'aide d'un pulvériseur à disques et d'un cultivateur. L'arrêt du travail à l'automne permet à des mauvaises herbes telles que le mouron (*Stellaria media*) de s'installer. Cette végétation adventice, enfouie au printemps, constitue un apport de carbone de l'ordre de 1 à 1,5 p. 1000 de terre sèche. Il ne s'agit donc pas d'un témoin véritable en ce sens qu'il y a un certain apport de matière organique.

Engrais vert : sol nu travaillé avec enfouissement au printemps d'un ray-grass d'Italie (*Lolium italicum*) semé à l'automne précédent. Le sol est maintenu propre pendant l'été avec les mêmes passages d'outil que sur le témoin. L'engrais vert étudié ici est le premier que reçoivent les parcelles. Les parcelles « témoin » et « engrais-vert » parties intégrantes de l'essai « mode d'entretien » sont répétées 4 fois.

En outre, on a mis en place, dans la zone des bordures, les parcelles suivantes de 1 m² de surface :

— *parcelles « fauchées »* : avant le retournement de l'engrais vert, on a enlevé les parties aériennes. On trouve donc dans le sol après le travail les racines et les bases de tige ;

— *parcelles « herbe »* : on y a apporté avant le retournement, les parties aériennes enlevées des parcelles précédentes.

Les parcelles « fauchées » et « herbe » n'ont pu être installées que dans les zones où la quantité d'azote apportée est 2 fois moins forte que dans les parcelles principales. Comme la pousse du ray-grass d'Italie y était un peu moins importante, elles ne sont pas rigoureusement comparables aux parcelles « témoin » et « engrais-vert ». Elles ne sont répétées que 2 fois.

3° *Déroulement de l'essai et conditions climatiques*

Témoin : 1963 : 28 octobre : passage du pulvériseur à disques. 1964 : 10 avril : un passage de pulvériseur. 12 mai : pulvériseur. 30 mai : pulvériseur. 4 juillet : canadien. 29 juillet : canadien. 21 septembre : canadien. Même apport d'azote que sur l'engrais-vert.

Engrais vert : 1963 : 2 septembre : semis. 15 novembre : 15 unités d'azote. 11 décembre : 30 unités d'azote.

1964 : 10 avril : retournement de l'engrais vert par 3 passages de pulvériseur à disques. Par la suite, travail du sol comme dans le témoin.

Pour définir l'année, au point de vue climatique, nous donnons les précipitations mesurées sur le verger et les températures moyennes de la station la plus proche, Romilly-sur-Seine.

Mois	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Pluie (mm)	34,7	48,8	64,8	72,6	32,6	44,1	28,3	13,3	55,0	37,3	63,0	41,0
Température moyenne (°C).	0,0	5,7	5,5	9,6	14,0	16,1	19,1	17,9	16,3	8,8	6,8	1,9

4° *Prélèvement et échantillonnage pour les déterminations de laboratoire*

Tous les 10 jours ont été prélevés des échantillons correspondant à l'épaisseur de sol travaillée par le pulvériseur, soit 10-12 cm. Le premier prélèvement a été effectué le 10 avril.

Les prélèvements ont été effectués au centre de l'interligne où la pousse de l'engrais vert était la plus régulière et le mélange de la matière végétale au sol le plus homogène, ce qui n'est pas le cas sous le passage des roues (difficulté de terrage des disques) ou au voisinage des arbres (dont les outils restent éloignés).

Pour chacune des parcelles « témoin » ou « engrais-vert » on a constitué un échantillon moyen à partir de 4 prélèvements. On disposait finalement de 4 répétitions pour chaque traitement.

Pour les parcelles « fauchée » et « herbe », compte tenu de leur exiguïté, on a constitué un échantillon moyen de faible volume à partir de 2 prélèvements. On avait finalement 2 répétitions pour chacun de ces traitements hors essai.

5° *Appréciation de la stabilité structurale*

Pour apprécier la stabilité de la structure, c'est-à-dire sa résistance aux dégradations, nous avons utilisé la méthode proposée par HÉNIN et ses collaborateurs (HÉNIN, MONNIER et COMBEAU, 1958).

Rappelons brièvement qu'il s'agit d'une série de tamisages à 200 μ effectués sous l'eau et dans des conditions standard sur des échantillons du sol étudié, composés d'agrégats séchés à l'air, d'une taille inférieure à 2 mm.

Préalablement au tamisage, certains échantillons sont humectés par des liquides organiques dans le but d'apporter des nuances à l'action directe de l'eau sur la terre sèche. C'est ainsi qu'un échantillon est « prétraité » à l'alcool éthylique, un deuxième au benzène, le troisième ne recevant aucun prétraitement.

Nous avons précisé et justifié récemment (G. MONNIER, 1965) l'interprétation particulière que chacun de ces prétraitements autorise.

Le prétraitement à l'alcool, en atténuant l'action de l'eau sur les agglomérats, traduit de façon très sensible les variations de stabilité dûes principalement aux modifications de la cohésion de la terre humide, facteur de résistance des agrégats.

Le prétraitement au benzène, qui accroît la sensibilité des terres aisément mouillables, mais accentue le comportement hydrophobe des parois des pores dès que celui-ci se manifeste, fournit un test particulièrement sensible aux variations de la stabilité du sol consécutives à des modifications, même faibles, de sa mouillabilité. Comme la plupart des substances organiques introduites dans le sol accroissent sa stabilité en diminuant sa mouillabilité (G. MONNIER, 1965), le test au benzène est particulièrement intéressant pour des études telles que celle dont il est question ici.

On obtient ainsi trois taux d'agrégats stables : à l'alcool (Ag_a p. 100), au benzène (Ag_b p. 100) et, sans prétraitement (Ag_e p. 100) obtenu par action directe de l'eau sur la terre sèche. Ce dernier taux d'agrégats n'autorise pas d'interprétation particulière.

Lorsque ces taux d'agrégats sont diminués de la quantité de sables grossiers (> 200 μ) qu'ils renferment, ils sont dits « agrégats vrais ». A partir de ces éléments et en tenant compte de la quantité d'éléments inférieurs à 20 μ qui apparaissent au cours des opérations de tamisage, il est possible d'établir un indice unique S ou I_s. Cet indice permet seul de classer les sols d'origine différente les uns par rapport aux autres. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'étudier une évolution de faible amplitude d'un sol, il est préférable de s'en tenir à l'examen des résultats partiels des tests à l'alcool et au benzène.

6° *Dosage des matières organiques* (effectué tous les 20 jours)

On a coutume de doser globalement les matières organiques contenues dans le sol en appréciant le pouvoir réducteur de ce dernier et en l'exprimant en carbone organique par l'intermédiaire d'un coefficient d'équivalence établi une fois pour toutes (P. ANNE, 1945). Toutefois, les matières organiques totales sont très diverses. Aussi, avons-nous utilisé une méthode de fractionnement densimétrique (G. MONNIER et *al.*, 1962) qui permet de séparer et de doser à part les matières organiques « libres », juxtaposées au reste du sol et les substances véritablement liées à la partie minérale. La fraction libre, de rapport C/N élevé et variable, est généralement constituée par des matières fraîches, d'apport récent, peu ou pas évoluées. Elle est susceptible, lorsque les conditions sont favorables, de se lier rapidement aux particules minérales. La fraction liée dont le rapport C/N est relativement constant et se situe au voisinage de 10, est surtout composée, excepté dans certaines situations, de substances biologiquement stables. Elle correspond donc à ce que l'on appelle généralement l'humus. Elle peut toutefois comprendre des produits transitoires de l'humification.

L'intérêt de ce fractionnement apparaît clairement dans l'étude de l'évolution à court terme d'un amendement organique dans le sol.

Les substances libres ne sont évidemment pas à même, sous cette forme, de modifier un comportement physico-chimique du sol tel que sa stabilité structurale. C'est par la liaison des produits de leur décomposition que la potentialité qu'ils représentent se réalise. Par ailleurs, c'est seulement lorsque cette transformation est complète et aboutit à des matières liées se maintenant à un niveau relativement stable dans le temps qu'il devient possible d'établir leur rendement en humus.

Nous examinerons donc séparément l'évolution de ces deux formes de matières organiques chaque fois que l'évolution de la matière organique totale sera incapable de nous fournir une explication suffisante du comportement du sol.

Pratiquement, la technique utilisée a été la suivante :

a) *Préparation des échantillons* :

Sur la totalité de l'échantillon sec, étalé sur un plateau, et dont les mottes ont été divisées à la main, on procède au tri des débris organiques les plus grossiers. Cette opération permet d'obtenir par la suite un échantillon plus homogène lors de la prise d'essai pour le dosage des matières organiques. Ces débris sont pesés et rapportés au poids de terre dont ils ont été retirés.

Environ 300 g de l'échantillon ainsi préparé sont ensuite tamisés à 2 mm et une prise de 50 g en est retirée qui est broyée au mortier jusqu'à passage complet au travers d'un tamis de 0,2 mm d'ouverture de maille.

C'est sur cette poudre qu'on prélève les prises en vue du dosage des matières organiques.

b) *Dosage du carbone total* :

Une prise de poudre contenant de 20 à 30 mg de carbone organique est traitée par la méthode de P. ANNE (1945), l'attaque sulfochromique étant faite à l'aide d'une solution de bichromate à 8 p. 100.

c) *Fractionnement densimétrique* :

10 grammes de poudre sont centrifugés dans un mélange alcool-bromoforme de densité 2. La fraction surnageante est essentiellement constituée par les matières organiques libres telles que nous les avons définies, tandis que le culot comprend la partie minérale du sol et les matières organiques plus ou moins évoluées qui lui sont liées.

Le carbone organique est alors dosé, toujours par la méthode de ANNE, mais séparément sur chaque fraction et rapporté à la terre totale.

Si nous désignons par MO_m. le taux p. 1 000 des débris organiques retirés à la main lors de la préparation de l'échantillon et si nous considérons que ces débris ont une teneur en carbone sensiblement constante et voisine de 30 p. 100, la teneur en carbone organique total de l'échantillon peut être obtenue, soit par la somme :

C total p. 1000 par la méthode de ANNE + 0,3 MO_m.

soit, dans le cas où on a procédé à un fractionnement densimétrique, par la somme :

$$\underbrace{0{,}3 \times \text{M.O.}_m\ {}^{o}/_{oo} + \text{C}_{\text{libre}}\ {}^{o}/_{oo}}_{\text{Matières organiques libres}} + \underbrace{\text{C}\,{}^{o}/_{oo}\ \text{lié}}_{\text{Matières organiques liées}}$$

7° *Degré de perméabilité* (Muntz)

Un cylindre de 1 dm² de section est enfoncé de 6 cm dans le sol ; on y suit dans le temps l'infiltration de l'eau sous une charge constante de 3 cm.

Nous avons pris comme indice de perméabilité l'épaisseur de la lame d'eau infiltrée pendant 1 heure.

8° *Densité apparente*

Enfoncement dans le sol de cylindres métalliques de 10 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur. Pesée de la terre contenue dans le volume du cylindre après correction due à l'humidité.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

I — *Évolution comparée du taux de matière organique dans les parcelles témoins et dans les parcelles ayant porté un engrais vert*

La première constatation que l'on peut faire lorsqu'on examine le graphique 1 figurant l'évolution en fonction du temps du taux de carbone organique des différentes parcelles est que la teneur en carbone du témoin n'est pas stable, elle décroît rapidement à partir du premier travail du sol (effectué au temps zéro) pour se stabiliser aux environs de 10 p. 1 000, 120 jours plus tard. Nous pouvons considérer que cette évolution correspond à la décomposition rapide, après sa mort et son mélange au sol, de la végétation adventice qui s'est développée au cours de l'hiver dans les parcelles-témoins. Le palier qui est finalement atteint représente alors approximativement la teneur en carbone d'un témoin qui aurait été maintenu exempt de toute végétation ; c'est par rapport à lui que nous devons étudier l'évolution de la matière organique dans les parcelles « engrais-vert ». Nous allons donc indiquer, tout d'abord, comment il est possible d'évaluer cette valeur plancher du témoin.

1° *Évaluation de la valeur plancher du témoin.*

En posant y = taux p. 1 000 de carbone du témoin.
a = taux p. 1 000 de carbone correspondant à la valeur plancher.
b = taux p. 1 000 de carbone provenant de l'enherbement spontané.
c = une constante.
t = temps exprimé en jours.
e = base des logarithmes népériens.

la fonction $y = a + be^{-ct}$ est susceptible de représenter le phénomène dont les grandes lignes apparaissent sur le graphique.

En effet, pour $t = 0$, $y = a + b$

lorsque $t \to +\infty$, $y \to a$

La détermination de la fonction précédente implique le calcul de 3 paramètres. Comme la méthode des moindres carrés ne permet d'en calculer facilement que 2, nous nous sommes bornés à montrer que l'adoption comme valeur du palier, du taux moyen des 3 derniers points expérimentaux (120e, 140e et 160e jour), est com-

patible avec la représentation par la fonction précédente du phénomène traduit par la position sur le graphique des points expérimentaux. Ce taux moyen étant de 10,02 p. 1 000, nous avons fixé à 10 la valeur de a compte tenu de la précision de nos mesures, et calculé b et c après avoir transformé ainsi la fonction :

$$\log_{10} (y - 10{,}00) = \log_{10} b - \frac{ct}{2{,}302}$$

On obtient finalement :

$$y = 10{,}00 + 1{,}49\ e^{-0{,}0248t}$$

Cette fonction, à la différence de fonctions linéaires ou paraboliques essayées au préalable, permet de calculer une régression significative au seuil 5 p. 1 00. Son existence justifie donc l'adoption de la valeur 10 p. 1 000 comme valeur-plancher du témoin (fig. 1).

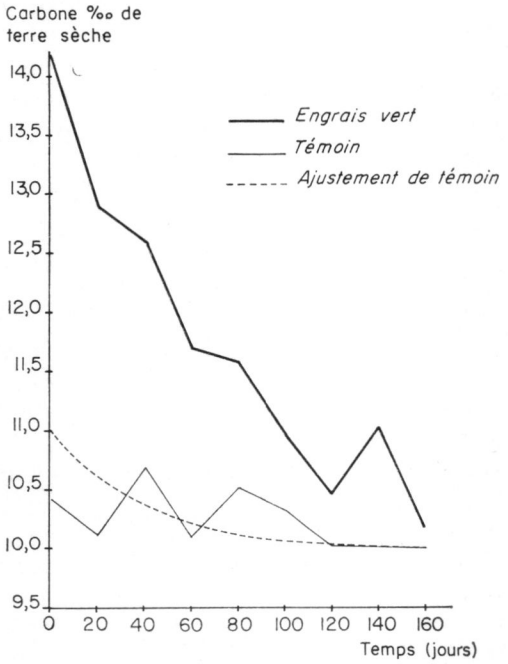


FIG. 1. — *Évolution du taux de carbone organique des parcelles témoin et engrais-ve.*

Notons, par ailleurs, que l'existence de cette régression, malgré la grande variabilité des teneurs en carbone, liée au caractère spontané de l'enherbement, confirme que la quantité de matière fraîche due à l'enherbement spontané n'est pas négligeable puisqu'elle est de l'ordre de 1 p. 1 000 de carbone dans une masse de sol représentant environ 1 000 t à l'hectare, soit environ 2 tonnes de matière sèche à l'hectare.

2° *Évolution de la matière organique due à la végétation de l'engrais vert.*

Compte tenu de ce qui précède, nous avons considéré que la matière organique dont la présence dans le sol était spécifique du traitement « engrais vert » pouvait

être évaluée à chaque instant comme la différence entre la teneur en matière organique totale des parcelles engrais-vert et la valeur plancher du témoin (10,0 p. 1 000). Il n'y a eu, en effet, aucun développement de mauvaises herbes dans l'engrais vert.

Le premier problème qui se pose est de savoir quelle est l'origine et la nature de cette matière organique supplémentaire.

La comparaison des taux de matières organiques libres et liées dans les deux séries de parcelles, immédiatement après le premier travail du sol, montre que la différence porte uniquement sur la fraction libre et correspond donc à la seule masse végétale fraîche de l'engrais vert. Ceci rendra plus simple l'interprétation de l'évolution constatée.

a) *Évolution de la matière organique totale*

Pour préciser l'allure du processus de décomposition, nous avons essayé d'ajuster une courbe aux points expérimentaux de telle manière que la fonction représentée corresponde à un type simple d'évolution.

Dans ce but, nous avons essayé les fonctions suivantes qui sont constamment décroissantes et dont certaines s'annulent pour les valeurs infinies positives du temps.

y étant la teneur en carbone précédemment définie (C p. 1 000 des parcelles engrais-vert — 10 p. 1 000) et t le temps (en jours) :

$$y = at + b \qquad a < 0 \tag{1}$$

$$y = ae^{-bt} \tag{2}$$

$$y = \frac{a}{t^m} \qquad m > 1 \tag{3}$$

La régression linéaire (1) calculée pour l'ensemble des points expérimentaux, bien que significative au seuil 5 p. 1 00, est peu précise. En particulier, elle ne rend pas compte de la diminution de la vitesse de décomposition sensible sur le graphique 1 vers le 120e jour.

Les deux autres fonctions (2) et (3) se transforment en droite par anamorphose logarithmique.

$$y = ae^{-bt} \qquad \log y = \log a - \frac{bt}{2{,}302}$$

$$y = \frac{a}{t^m} \qquad \log y = \log a - m \log t$$

En fait, portés sur du papier semi-logarithmique (fonction 2) ou logarithmique (fonction 3), les points expérimentaux ne sont pas alignés mais disposés autour de 2 segments de droite se coupant dans la zone des 60e au 80e jour (fig. 2). Il n'est pas possible de représenter l'ensemble des points expérimentaux par une fonction unique linéaire, exponentielle ou en $1/t^m$, mais il est raisonnable de rechercher à l'aide de ces fonctions un ajustement séparé pour les 2 groupes de points correspondant respectivement aux 60 premiers jours, puis à la période suivante.

L'interprétation du fait précédent est aisée : la masse végétale d'un ray-grass d'Italie n'est pas homogène ; elle comprend, en effet, deux types de matériaux : les parties aériennes et les racines et l'on conçoit que la décomposition des premières soit plus rapide que celle des deuxièmes et qu'elle la précède. L'observation directe sur le terrain des débris organiques encore présents aux différentes dates de prélè-

vement, sont en faveur d'une telle interprétation et nous verrons plus loin que d'autres faits viennent la confirmer.

Nous avons utilisé les appellations « parties aériennes » et « racines » pour la commodité de l'expression. Elles correspondent *strictement parlant* au fractionnement que l'on opère au cours d'une fauche et très approximativement aux termes

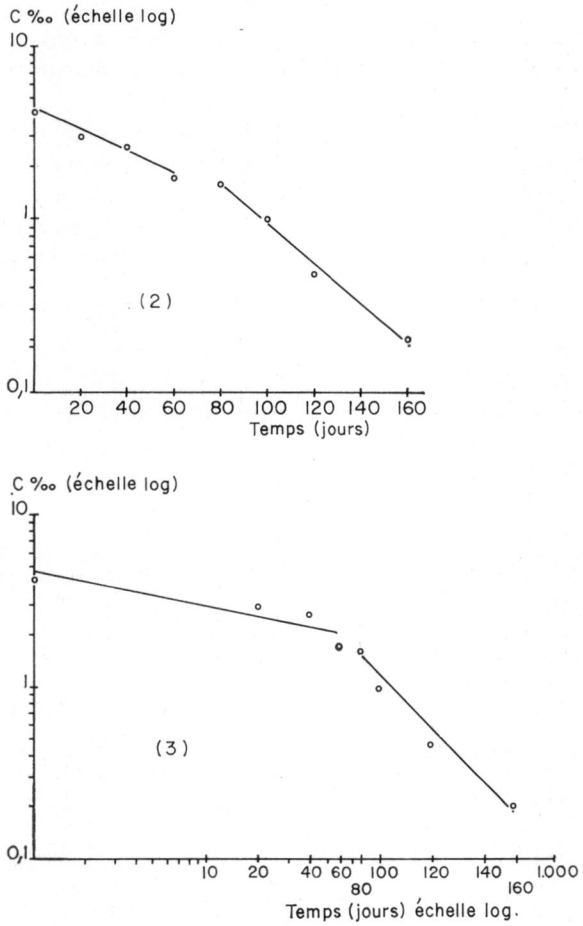


FIG. 2. — *Essais des ajustements* ae^{-bt} (2) et $\frac{a}{t^m}$ (3).

botaniques. En fait, ces termes recouvrent deux groupes de substances à vitesse d'évolution différente et il est probable que le groupe « parties aériennes » contient de jeunes racines facilement décomposables et le groupe « racines » des parties aériennes relativement résistantes.

Pour déterminer les deux meilleurs ajustements, nous avons repris les types de fonction (1), (2), (3) déjà proposés plus haut. Comme la fonction $y = \frac{a}{t^m}$ tend vers plus l'infini pour $t = 0$, la courbe qui la représente ne peut passer par le point initial,

d'ordonnée finie ; nous avons donc été amenés à ajouter à t un terme constant t_0 ce qui transforme (3) en :

$$y = \frac{a}{(t + t_0)^m}$$

Nous verrons ultérieurement quelle justification théorique on peut donner à cette adjonction.

D'autre part, conformément à notre hypothèse, nous avons pris comme origine des temps pour les parties aériennes, la date de l'enfouissement et pour les racines le 80e jour.

L'ordonnée de l'asymptote pour les racines est évidemment, lorsqu'elle existe, la valeur plancher du témoin. Nous étudions en effet l'évolution de la seule matière organique qui provient de l'engrais vert. De la même manière, au cours de la décomposition des parties aériennes, le taux de matière organique tend vers la valeur ajustée du taux correspondant au début de la décomposition des racines (80e jour).

Enfin, pour l'étude de la fonction $y = \frac{a}{(t + t_0)^m}$, comme on ne peut déterminer aisément 3 paramètres, nous avons donné à t_0 différentes valeurs et calculé a et m par la méthode des moindres carrés.

Le tableau ci-dessous permet de comparer les ajustements qui ont été établis en tenant compte de ces diverses conséquences de notre hypothèse de départ.

Matériau / Fonction	« Parties aériennes » 0-60 j.	« Racines » 80-160 j. origine des t au 80e j.
$y = at + b$	$y = 0{,}038\ t + 3{,}93$ (5 %)	non significatif
$y = ae^{-bt}$	non significatif	$y = 1{,}54\ e^{-0{,}026\ t}$ F = 174,42 (1 %)
$y = \frac{a}{(t + t_0)}\ m$	non significatif	$y = \frac{4\,478 \times 103}{(t + 200)^{6{,}27}}$ F = 270,38 (1 %)

On constate que, pour les « parties aériennes », seul l'ajustement à une fonction linéaire est significatif. Pour « les racines », les seuils de signification sont identiques pour l'exponentielle ou la courbe en $\frac{1}{t^m}$. Nous retiendrons toutefois la courbe en $1/t^m$ pour laquelle le test F est le plus élevé. C'est donc cette dernière qui figure sur le graphique 3.

En résumé, l'évolution de la matière fraîche apportée au sol par la culture du ray grass d'Italie s'est poursuivie dans les conditions de notre essai en 3 phases successives.

1° Du retournement de l'engrais vert jusqu'au 60e jour.

2° Du 60e au 80e jour l'évolution semble arrêtée.

3° Du 80e jour au 180e jour l'évolution reprend, mais la loi qui la régit est différente.

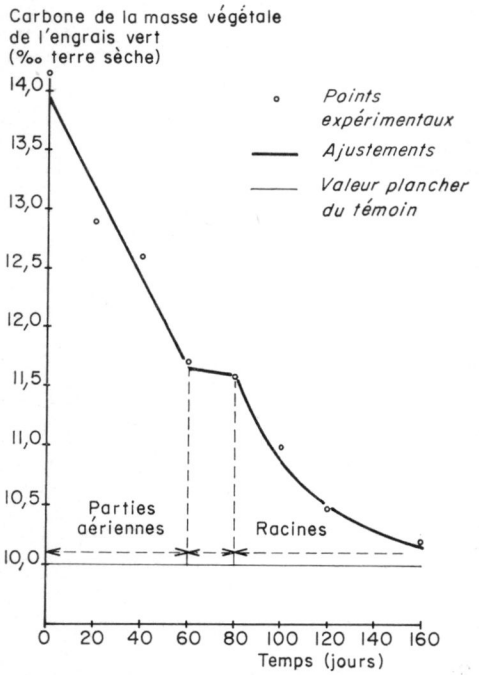


FIG. 3. — *Ajustements représentant la décomposition de la matière organique de l'engrais-vert*

S'il ne faut pas, compte tenu du petit nombre de points expérimentaux, attacher une importance exagérée à la forme même des ajustements, nous pouvons cependant constater que les différentes équations essayées proviennent toutes de l'équation différentielle générale :

$$dy = - ky^n dt.$$

Pour $n = 0$

$$dy = - kdt$$
$$y = - kt + C$$

Pour $t = 0$, $y = y_0$ d'où $C = y_0$

$$y = y_0 - kt.$$

Nous trouvons la fonction linéaire à laquelle nous avons pu ajuster l'évolution de la fraction « parties aériennes » de l'engrais vert.

Pour $n = 1$

$$dy = kydt$$
$$y = e^{-k(t+c)} = e^{-kt} \times e^{-kc}$$
$$y = e^{-kt} \times e^{c'}.$$

Pour
$$t = 0$$
$$y = y_0 = e^{c'}$$
$$y = y_0 e^{-kt}.$$

Cette fonction exponentielle est l'une de celles qui sont susceptibles de représenter la décomposition de la fraction « racines » :
— pour n quelconque

$$dy = -ky^n dt$$
$$y = (1 - n)(-kt + C)^{1/1-n}$$

est une courbe décroissante si $\frac{1}{1-n} < 0$ c'est-à-dire si $n > 1$.

Pour
$$t = 0$$
$$y = y_0$$
$$y_0 = -(1 - n)C^{1/1-n} = (1 - n)C'^{1/1-n}$$
$$C' = \left(\frac{y_0}{1-n}\right)^{1-n}$$
$$y = \frac{1-n}{\left[-kt + \left(\frac{y_0}{1-n}\right)^{1-n}\right]^{\frac{-1}{1-n}}}$$

qui, en posant $\frac{1}{1-n} = m$ s'écrit avec d'autres constantes

$$y = \frac{a}{(t + t_0)^m}$$

fonction de la forme de celle qui a été retenue pour représenter l'évolution de la fraction « racines ».

Cette parenté donne une certaine unité aux équations susceptibles de représenter la décomposition de la matière organique.

Les rythmes de décomposition sont différents pour les parties aériennes et pour les racines.

Pour les parties aériennes, la quantité dy qui se décompose pendant le temps dt est indépendante de la quantité restante ($dy = -kdt$). Dans le cas des racines, la quantité dy est proportionnelle à une puissance de la quantité restante ($dy = -kydt$ ou $dy = -ky^n dt$).

b) *Mécanisme de l'évolution du carbone*

Maintenant que nous avons examiné l'évolution d'ensemble de la matière organique totale, il nous reste à rechercher quel est le mécanisme de la minéralisation du carbone qu'elle traduit. Nous nous baserons pour cela sur les résultats du fractionnement densimétrique dans les parcelles « engrais-vert » et « témoin », ainsi que dans les parcelles où nous avons enfoui séparément des parties aériennes seules (parcelles « herbes ») et des parties souterraines (parcelles « fauchées »).

Le graphique 4 indique l'allure de l'évolution moyenne des 2 fractions libres et liées de ces différentes parcelles dans les blocs I et IV.

On constate qu'au cours des 60 premiers jours, la diminution du taux de matière organique totale des parcelles « engrais-vert » (3,5 p. 1 000 de carbone) correspond approximativement à la diminution de leur teneur en matière organique libre. Au cours de la même période, nous pouvons également constater que malgré l'imprécision des points expérimentaux qui traduisent, rappelons-le, le comportement de

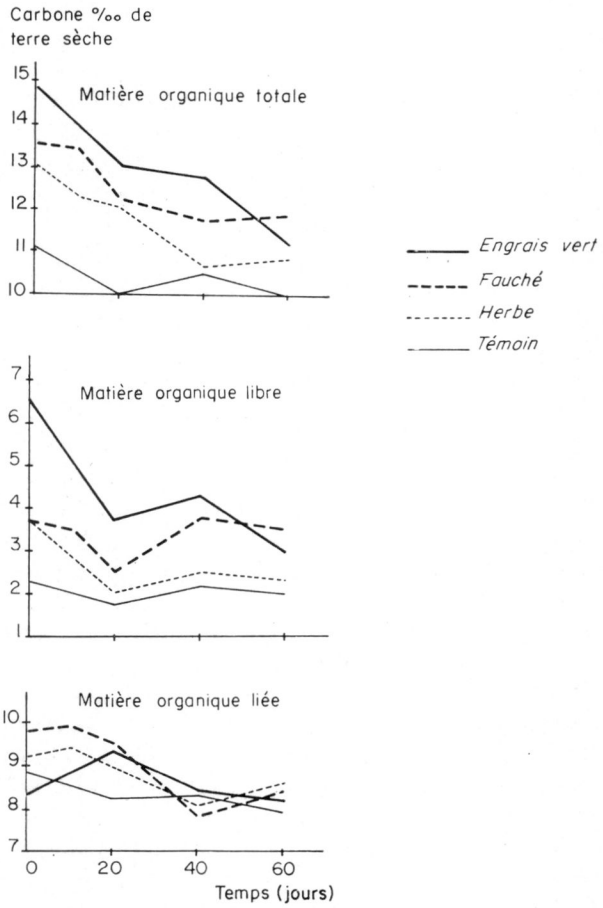


FIG. 4. — *Évolution des fractions libres, liées et totales pour les parcelles des blocs 1 et 4*

2 blocs seulement, il existe un parallélisme entre les parcelles « engrais-vert » et les parcelles « herbes », alors que les parcelles « fauchées » subissent une évolution plus comparable à celle du témoin.

Au 60e jour le résultat de ces différentes évolutions se traduit par la situation suivante.

— En ce qui concerne les matières organiques libres, les parcelles « fauchées » et « engrais-vert » présentent des taux comparables, compris entre 3 et 3,5 p. 1 000 de carbone, alors que les parcelles « témoins » et les parcelles « herbes » se rejoignent au taux de 2 p. 1 000 de carbone.

— Pour les matières organiques liées, les teneurs des 4 types de parcelles sont très groupées comprises entre 8 et 8,5 p. 1 000 de carbone.

— Enfin, il existe au 20e jour dans les deux seules parcelles comportant l'enfouissement de parties aériennes (« engrais-vert » et « herbes ») une remontée, momentanée d'ailleurs, du taux de matières organiques liées.

L'ensemble de ces faits peut alors être interprété de la façon suivante :

Au cours des 2 premiers mois qui ont suivi l'enfouissement, l'évolution a principalement porté sur les parties aériennes et n'est donc sensible que sur les parcelles « engrais-vert » et « herbes ». Les parties aériennes se sont décomposées très rapidement en fournissant des substances en quantité suffisante vers la fin du 1er mois pour qu'apparaisse une remontée du taux de matière liée dans les 2 séries de parcelles intéressées. Ces substances n'étaient pas biologiquement stables, car elles se sont, en majorité au moins, minéralisées au cours du mois suivant. Il s'agit donc là de ces produits transitoires de l'humification dont nous avons montré (G. MONNIER, 1965) qu'ils pouvaient apparaître en quantité relativement importante dans le sol à la suite de la *transformation rapide* de matières fraîches végétales très fermentescibles, ce qui est le cas, nous venons de le constater, pour les parties aériennes du ray-grass d'Italie.

— L'évolution peu marquée au cours des 60 premiers jours des 2 formes de matière organique dans les parcelles « fauchées » qui ne comportaient que des racines confirme cette hypothèse.

L'exiguïté des parcelles « herbes » et « fauchées » que nous avions aménagées dans l'essai n'ont malheureusement pas permis de poursuivre la comparaison au cours des mois suivants. Les prélèvements successifs avaient en effet rendu l'échantillonnage de plus en plus délicat au moins en ce qui concerne les fractions libres de matières organiques.

Il reste que nous avons pu trouver là une confirmation très nette de l'hypothèse qui nous avait été suggérée par la nécessité de traduire par 2 ajustements distincts les évolutions intervenues respectivement avant et après le 60e jour.

Des expériences ultérieures dans des conditions mieux contrôlées seront nécessaires avant de conclure avec certitude, mais nous pouvons déjà affirmer qu'il existe de nombreuses présomptions en faveur d'une évolution en 2 phases successives du ray-grass d'Italie ; les parties aériennes plus fermentescibles se décomposant avant les racines. Il est bien probable que, dans notre essai, les conditions climatiques ont favorisé une séparation nette entre les 2 stades. En particulier, une période plus fraîche entre le 60e et le 80e jour s'est traduite par un palier au cours duquel la décomposition des « parties aériennes » étant terminée, la décomposition des racines n'avait pas encore commencée. Dans d'autres conditions, un certain chevauchement est probable, les racines les plus fermentescibles pouvant évoluer en même temps que les « parties aériennes » les plus résistantes. Il n'en reste pas moins qu'en règle générale l'allure et la vitesse de décomposition des deux fractions sont différentes. Ceci sera confirmé par les conséquences de leur évolution sur la stabilité structurale.

Enfin, en ce qui concerne la teneur en matière organique totale des parcelles « engrais verts » à la fin de notre expérience (160e jour), elle n'est supérieure au témoin que de 0,2 p. 1 000 de carbone, différence non significative. Une étude plus précise après fractionnement densimétrique montre, de plus, que ce faible reliquat est uniquement constitué de matières organiques libres, vraisemblablement un reste

des racines les plus résistantes, non encore entièrement décomposées. On peut donc conclure que le rendement en humus de la culture d'engrais vert, qui ne pourra évidemment être établi avec certitude que lorsque la décomposition totale aura été constatée, sera extrêmement faible, en pratique nul. Il ne faut donc pas s'attendre à ce que cette technique d'entretien du sol ait une action cumulative d'une année sur l'autre, aussi bien en ce qui concerne le niveau humique que les propriétés qui en dépendent.

II — *Évolution de la stabilité structurale*

Pour les raisons que nous avons données en présentant la méthode d'étude, nous examinerons principalement les variations des différents taux d'agrégats stables. De plus, comme parmi ces derniers le taux d'agrégats stables après prétraitement au benzène corrigé des sables grossiers (Ag_b p. 100 vrais) est la caractéristique la plus sensible des variations de stabilité provoquées par les matières organiques diverses, nous nous appuierons plus particulièrement sur son étude.

1° *Comparaison au moment du retournement des stabilités structurales des différents traitements.*

L'étude des échantillons prélevés immédiatement après le premier travail au printemps (point zéro) montre clairement que les parcelles « engrais-vert » et témoin ont, au départ, la même stabilité pour tous les prétraitements. Il ne s'est donc pas produit, au cours de la végétation du ray-grass d'Italie, pendant l'automne et l'hiver, de phénomènes susceptibles de modifier le comportement de la structure vis-à-vis de l'eau. Ceci peut-être rapproché du fait, noté précédemment, que la seule différence entre les taux de matières organiques des deux séries de parcelles portait, au moment du retournement, sur les matières organiques libres. Les teneurs en matières organiques liées, seules susceptibles d'influer sur la stabilité structurale se sont avérées tout à fait comparables.

Sans exclure la possibilité d'une action protectrice de la végétation sur le sol au cours d'hivers très pluvieux, nous constatons donc une fois de plus (G. MONNIER, 1965) que la culture d'une graminée n'aboutit à une modification de stabilité que dans la mesure où elle provoque un accroissement de la quantité des matières organiques liées présentes dans le sol ; ce qui ne se produit généralement pas au cours de la première année de végétation.

2° *Évolution de la stabilité structurale dans les parcelles témoins.*

Le graphique 5 indique que dès la fin du mois de mai, la stabilité structurale augmente dans les parcelles témoins. Elle atteint ainsi un maximum au cours des mois de juillet et août, avant de redescendre plus ou moins régulièrement et de revenir à sa valeur initiale à la fin de l'expérience.

L'examen comparé des différents taux d'agrégats stables montre que ces derniers sont tous affectés, les agrégats stables après prétraitement à l'alcool éthylique subissant des variations d'une ampleur supérieure, alors que le taux d'Ag_b varie dans l'ensemble plus modérément, mais d'une manière plus régulière. Ces caractéristiques nous conduisent à penser qu'il s'agit ici du phénomène de la variation saisonnière

de la stabilité structurale. Cet accroissement de la résistance de la structure au cours des mois d'été où le sol est plus chaud et plus sec a été mis en évidence par HÉNIN et TURC (1949) et depuis, de nombreux auteurs (A. COMBEAU et P. QUANTIN, 1963 ; G. MONNIER, 1965) ont souligné son importance. Son mécanisme est certainement complexe, mais nous avons montré (G. MONNIER, 1965) qu'il pouvait être

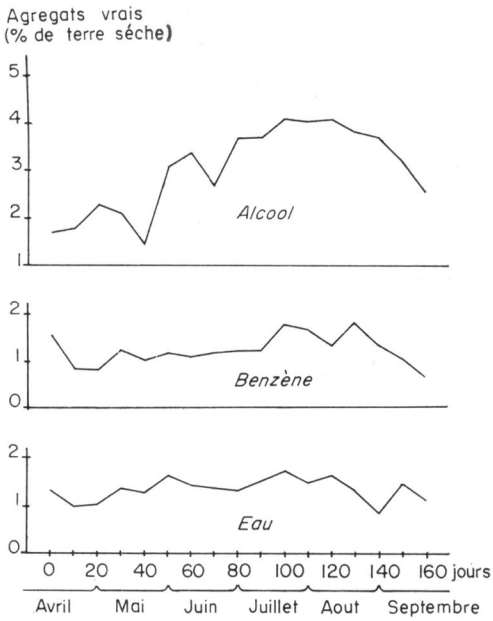


FIG. 5. — *Stabilité structurale des parcelles témoins*

d'autant plus net que le sol contenait plus de matières organiques en cours d'évolution. Cet aspect se traduit par la variation du taux d'Ag_b. Ceci implique que si nous voulons suivre le comportement spécifique des parcelles « engrais-vert », nous devrons choisir comme caractéristique la différence :

$$Ag_b \text{ p. } 100 \text{ de l'engrais vert} - Ag_b \text{ p. } 100 \text{ du témoin.}$$

Cette différence englobera alors l'effet simple de l'évolution de la matière organique des parcelles « engrais-vert » et éventuellement l'accroissement de la variation saisonnière liée à cette évolution.

3° *Évolution de la stabilité structurale dans les parcelles engrais-vert.*

Le graphique 6 représente la différence de stabilité entre les parcelles « engrais-vert » et les parcelles témoins. Il permet de faire un certain nombre de constatations :

— Il existe deux périodes au cours desquelles il apparaît, en faveur des parcelles « engrais vert », des différences notables. Certaines d'entre elles étant significatives au point 0,1 p. 100.

— Entre ces deux périodes, il en existe une de 15 jours à 3 semaines au cours de laquelle les accroissements de stabilité par rapport au témoin diminuent considérablement, perdant d'ailleurs toute signification statistique.

L'interprétation de ce phénomène est facilitée en le rapprochant d'abord de l'évolution des matières organiques et ensuite des variations de stabilités dans les petites parcelles fauchées et dans celles où seules, les parties aériennes de ray grass avaient été enfouies.

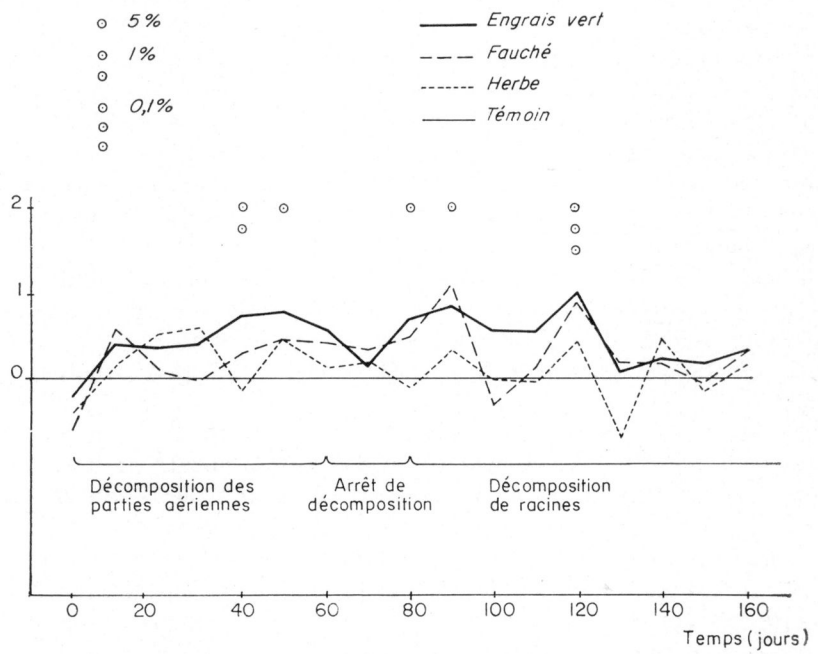


FIG. 6. — *Agrégats vrais benzène. Différences entre les traitements et le témoin*

Nous pouvons ainsi constater que les deux périodes au cours desquelles se manifeste un accroissement de stabilité structurale après engrais vert sont précisément celles au cours desquelles nous avions noté les deux types successifs d'évolution rapide de la matière organique de ces parcelles. De même, la période intermédiaire située aux alentours du 60e au 80e jour est caractérisée à la fois par un arrêt provisoire de la diminution du taux de carbone et par une disparition momentanée de l'action des engrais verts sur la stabilité structurale.

Nous retrouvons ici un phénomène déjà mis en évidence (G. MONNIER, 1965) : *c'est dans la mesure où un apport organique fermente, c'est-à-dire provoque l'apparition de corps microbiens et (ou) de substances préhumiques, qu'il a pour conséquence un accroissement de stabilité structurale.* Ce dernier est d'autant plus intense pour une masse d'apport donnée que l'évolution est plus rapide.

Examinons maintenant les variations du tauxd'Ag_b dans les parcelles « fauchées » et dans les parcelles « herbe ».

Nous pouvons constater qu'au cours de la première période de stabilisation, précédemment définie, ce sont les parcelles « herbes » qui manifestent les plus forts accroissements, et ceci dès les premières semaines. Les parcelles fauchées ne commencent à se distinguer des parcelles témoin que vers la fin de cette première période : 50e au 60e jour.

Par contre, à partir du 60e jour, les stabilités des parcelles « herbes » retombent et se maintiennent au niveau de celles des parcelles « témoin » ; ce sont les parcelles « fauchées » qui prennent au 80e jour le relais, en quelque sorte, présentant alors des accroissements de stabilité qui, bien que moins réguliers, sont de l'ordre de grandeur de ceux qui se manifestent sous les parcelles où la totalité de l'engrais vert a été enfouie.

L'interprétation à laquelle ces faits nous conduisent rejoint celle que nous avons proposée lors de l'étude de l'évolution des matières organiques. Au cours des 2 premiers mois, la décomposition intéresse principalement les parties aériennes du ray-grass d'Italie, plus fermentescibles. Elle se produit dans les parcelles « engrais-vert » et elle intervient également dans les parcelles « herbe ». Les accroissements provisoires de stabilité qui en découlent sont surtout sensibles au cours du 1er mois et ne sont pas observables dans les parcelles « fauchées ».

Du 60e au 80e jour, le ralentissement de la dégradation qui suit la complète disparition des parties aériennes et qui précède la décomposition des racines entraîne une baisse de stabilité. Cette dernière semble donc être liée au jour le jour, pourrait-on dire, à la formation en quantités suffisantes de produits de dégradation de la matière organique.

Après le 80e jour, ce sont les racines qui évoluent. Ce sont alors les parcelles « fauchées » qui présentent un comportement analogue à celui des parcelles « engrais-vert total » tandis que les parcelles « herbe » gardent un comportement très voisin de celui des parcelles témoins.

A la fin de notre expérience, les fermentations et leurs conséquences cessent de se manifester faute de métabolite : les niveaux de matières organiques sont descendus dans toutes les parcelles au niveau du témoin, ainsi que nous l'avons constaté. Corrolairement, la stabilité redescend au même niveau dans toutes les parcelles.

En définitive, il ressort que l'action d'un engrais vert sur la stabilité structurale peut être rapprochée de ce qui se passe lorsqu'on introduit dans le sol un métabolite très fermentescible comme le glucose (S. HÉNIN, 1944 ; G. MONNIER, 1965). L'accroissement de stabilité qui est alors constaté est lié aux fermentations qui se développent dans le milieu. Ces dernières s'atténuent au fur et à mesure que la quantité de sucre non encore métabolisée diminue. La stabilité retombe à son point de départ lorsque la fermentation est terminée, car elle ne laisse pratiquement aucun résidu.

Comme celui du glucose, l'effet d'un engrais vert semble pour sa plus grande part fugace et non cumulatif d'une année sur l'autre. Ceci l'oppose à celui d'un fumier susceptible de laisser à l'issue de sa décomposition dans le sol un résidu humique relativement stable et donc capable de maintenir à long terme une partie de l'effet obtenu lors de l'enfouissement.

III — *Structure en place et propriétés qui s'y rattachent*

1° *Avant le retournement de l'engrais vert.*

Le témoin et l'engrais vert présentent une structure fragmentaire polyédrique peu nette, moins nette encore, semble-t-il, sous l'engrais vert.

La perméabilité du sol sous engrais vert est inférieure à celle du témoin quoique de façon non significative.

Les constatations précédentes convergentes nous permettent donc d'affirmer

qu'il n'y a pas eu d'amélioration de l'état physique par l'engrais vert au cours de sa végétation. L'explication de cette absence d'action peut être recherchée dans deux directions :

— A la différence du témoin, le traitement engrais-vert comporte à l'automne la préparation d'un lit de semence donc la formation de terre fine. Cette façon superficielle pourrait accroître le colmatage du sol par les pluies.

— L'installation d'une végétation herbacée diminuerait à son début la perméabilité, effet constaté au laboratoire par K. BARLEY, (1954).

2° *Après le retournement de l'engrais vert.*

A l'observation, il est difficile de constater des différences entre témoin et engrais vert si ce n'est, évidemment, la présence de débris végétaux dans le second.

Les mesures de densités apparentes effectuées 74 jours après le retournement n'ont pas permis de mettre en évidence des différences significatives entre le témoin (1,16) et l'engrais vert (1,14).

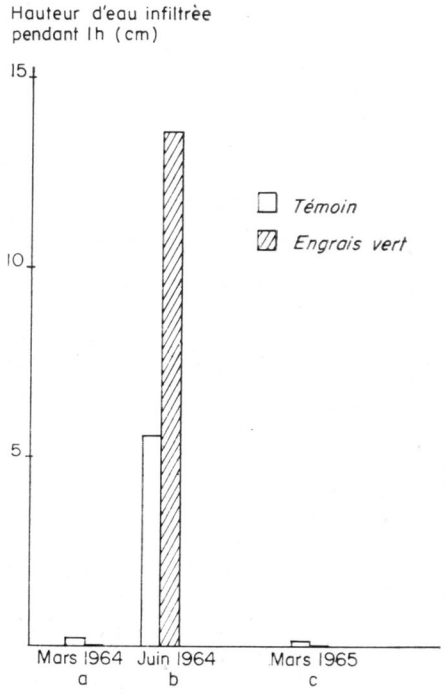


FIG. 7. — *Degrés de perméabilité*

A peu près à la même époque (76 jours après le retournement), le degré de perméabilité du sol des parcelles engrais-vert est significativement supérieur (seuil 5 p.100) à celui du témoin (fig. 7 *b*).

Précisons tout d'abord que ces perméabilités reflètent bien le comportement de la seule couche travaillée puisque les perméabilités des sous-sols n'étaient pas différentes dans les deux traitements.

La disparité entre les variations de densité apparente et de perméabilité peut s'expliquer par la relation entre celle-ci et la porosité (proportionnelle à la densité apparente) : d'après la formule théorique de KOZENY, la perméabilité varie comme la puissance 3 de la porosité. On conçoit alors que des variations de densité apparente non décelables dans notre dispositif expérimental puissent modifier significativement la perméabilité. D'autre part, pour une même valeur numérique de la porosité, des

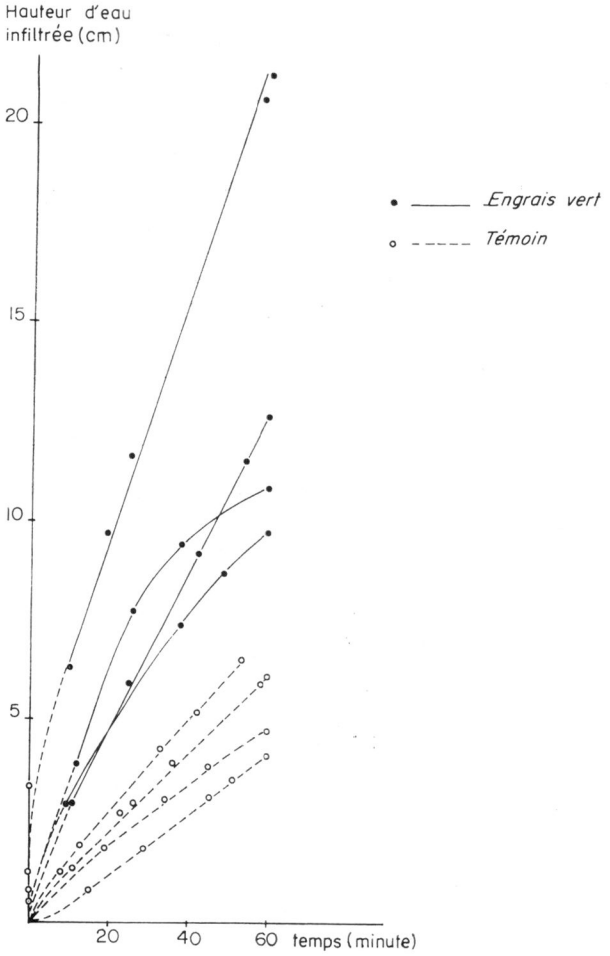


FIG. 8. — *Courbes d'infiltration*

changements dans la forme ou l'orientation des pores peuvent donner des perméabilités différentes. Enfin, l'obstruction d'un pore sur une très faible longueur le rend impropre à la transmission de l'eau, sans que la porosité soit sensiblement modifiée.

En vue de leur interprétation, les mesures de perméabilité doivent être placées dans leur contexte. Après le travail du sol, celui-ci a, du fait de sa structure fragmentaire, une perméabilité très élevée et donc non mesurable par nos techniques. Lorsque des pluies tombent sur le sol, il perd son aspect motteux à cause de la battance et

il devient possible d'établir un plan d'eau sur le sol et d'effectuer la mesure On conçoit alors que le degré de perméabilité ainsi mesuré soit en grande partie sous la dépendance de la quantité et de l'intensité des précipitations tombées entre le dernier travail du sol et la mesure.

L'examen des courbes représentant la quantité d'eau percolée en fonction du temps (fig. 8) peut fournir des renseignements sur ce qui se passe au moment de la mesure, la pente de la courbe représentant le degré de perméabilité instantané. Quoique la partie initiale de la courbe soit mal connue, on peut faire les remarques suivantes :

— Pour les témoins, les perméabilités, faibles, sont sensiblement constantes, les droites représentatives passant près de l'origine. Il n'y a donc pas de modification de structure au cours de la mesure.

— Pour les parcelles « engrais-vert », la perméabilité moyenne est plus élevée. mais on constate une diminution de la perméabilité instantanée, soit au début de la mesure, soit quelque temps après.

On peut avancer alors les explications suivantes : pour le témoin à stabilité structurale médiocre la quasi-totalité de la dégradation s'est produite avant la mesure, l'état structural atteignant une « valeur plancher ». La mesure montre effectivement une perméabilité faible et constante. Dans l'engrais vert, la meilleure stabilité (effectivement constatée) et l'existence de débris végétaux (les racines commencent seulement à se décomposer) réduisent l'action dégradante des précipitations, d'où une perméabilité initiale supérieure. Mais cette perméabilité diminue au moment de la mesure ; la stabilité suffisante pour conserver une partie de l'action du travail jusqu'à la mesure est trop faible pour permettre à la structure de résister à la dégradation intense d'un plan d'eau artificiel imposé brutalement.

3° *Avant le retournement de l'engrais vert suivant.*

On ne décèle plus aucun effet sur la perméabilité (fig. 7 *c*) ce qui confirme nos observations sur la nullité de l'effet améliorant de la végétation proprement dite de l'engrais vert et indique que celui qui avait été constaté pendant l'été a disparu.

CONCLUSIONS

Après avoir présenté les résultats concernant chacun des points sur lesquels notre analyse a porté, et avoir énoncé les interprétations qu'ils suggèrent, il nous reste à dresser le bilan général du comportement du sol sous engrais verts aux divers stades de l'expérience.

Nous pouvons d'abord souligner le fait qu'au cours de sa végétation, le ray-grass d'Italie n'a apporté aucune amélioration des propriétés physiques qui soit sensible à nos observations et mesures.

Cette absence d'effet concerne d'abord la structure du sol en place telle qu'elle apparaît lors d'observations sur le terrain, ou à la faveur de la mesure de l'une de ces principales conséquences : la perméabilité mesurée immédiatement avant le retournement de l'engrais vert. Il n'est pas exclu que dans certaines conditions,

l'installation rapide d'un enracinement fasciculé puisse, soit contribuer au maintien d'une structure favorable lorsque celle-ci a pu être établie avant le semis, soit assurer une certaine fragmentation selon un mécanisme encore non connu. Quoiqu'il en soit, ce comportement n'est pas une règle générale.

Citons parmi les explications plausibles de cette absence d'effet :

— les conséquences de la préparation du lit de semence du ray-grass et la diminution de porosité consécutive à l'installation des racines ;

— le fait qu'au cours de la végétation de l'engrais vert, il ne se soit produit aucun accroissement de la stabilité structurale, doit être rapproché des résultats obtenus sous prairie temporaire (G. MONNIER, 1965). Nous avons, en effet, noté que l'amélioration de stabilité ne devenait sensible qu'entre la 2e et la 3e année de repos du sol sous graminées. Pour qu'une telle action se manifeste, il est en effet nécessaire qu'une fraction suffisante des racines se décomposent, fournissant ainsi aux agrégats situés à proximité, un « habillage » protecteur de substances transitoires. Ce mécanisme n'intervient généralement pas avant 2 ans, et *a fortiori* pas au cours des 6 premiers mois, d'une culture d'herbe non exploitée.

Finalement, nous ne pouvons créditer ce premier stade que d'une action possible de protection mécanique contre la battance et le ruissellement sans, toutefois, que cette action ait été effectivement observée.

Les modifications de comportement du sol n'interviennent, en fait, qu'après le retournement. A ce moment-là, le travail du sol (plusieurs passages de pulvériseur à disques) tue le ray-grass d'Italie, en transforme la substance en métabolite et la mélange assez intimement à la masse de la couche superficielle du sol. Cette dernière opération, superflue pour les fractions souterraines, déjà bien réparties, prend toute son importance pour les parties aériennes. Les fermentations qui se déclenchent successivement pour les parties aériennes, puis pour les racines, assurent alors, par la production de substances transitoires diverses, la stabilisation de la structure fragmentaire résultant de l'action des outils d'entretien.

De même l'engrais vert n'intervient sur la perméabilité qu'après son retournement. Il s'agit en quelque sorte d'une action indirecte puisque l'engrais vert prolonge l'action dans le temps du travail du sol sur la structure, en atténuant l'action dégradante des précipitations. Les raisons de cette action sont à rechercher dans une meilleure stabilité structurale et dans la présence de débris végétaux qui, en créant des hétérogénéités, maintiennent ouvertes certaines fissures.

A la fin de l'expérience, enfin, le bilan humique de l'enfouissement de matière végétale s'avère, sinon peut-être rigoureusement nul, au mieux extrêmement faible. En corollaire, la stabilisation passagère disparaît (fait constaté également par J. MORTENSEN et J. YOUNG, 1960) et le comportement structural des différentes parcelles redevient analogue à ce qu'il était au départ.

Cette conclusion, en opposition avec l'opinion largement répandue, tant chez les praticiens que chez divers auteurs, qui veut qu'un engrais vert participe de façon non négligeable à la fourniture d'humus au sol, est celle à laquelle ont abouti avant nous divers autres auteurs (C. BAKER, 1937 et E. PROEBSTING, 1952) travaillant sur des sols de verger.

En définitive, et sans porter de jugement sur son incidence agronomique globale, l'enfouissement d'un ray-grass d'Italie dans un sol de limon battant de verger,

a eu des conséquences sensibles sur les propriétés physiques du sol. Mais ces effets ne se sont manifestés que d'une manière fugace et ne semblent pas pouvoir se cumuler, même partiellement, d'une année sur l'autre.

***

Après ce bilan de la culture d'un ray-grass d'Italie en engrais vert d'hiver et de son enfouissement en sol de verger, il paraît utile de faire quelques commentaires supplémentaires suggérés par ces résultats et aussi par la manière dont ils ont été obtenus.

Certains auteurs comme R. BENOIT *et al.* (1962) avaient signalé qu'ils obtenaient à peu près les mêmes résultats avec les seules parties souterraines et un engrais vert enfoui dans sa totalité. Les parcelles où les parties aériennes seules avaient été enfouies se comportaient, elles, comme les témoins n'ayant subi aucun apport organique. Les résultats que nous avons obtenus sont quelque peu différents. Les parties aériennes assurent, au cours de leur rapide décomposition, un premier accroissement de stabilité structurale. La contradiction pourrait toutefois, semble-t-il, n'être qu'apparente. Tout d'abord, les mesures de BENOIT *et al.* avaient été effectuées à des intervalles de temps plus longs que 10 jours ; la décomposition rapide des parties aériennes et les améliorations structurales fugaces qu'elle entraîne ont pu se situer entre deux mesures. Ensuite, il semble que l'enfouissement de l'engrais vert ait été effectué par ces auteurs à l'aide d'un seul labour, les tiges et feuilles ont été probablement beaucoup moins bien mélangées que dans le cas que nous avons décrit ici ; or, nous avons montré qu'un mélange intime des débris était une condition indispensable à l'efficacité des substances transitoires formées à leur dépens.

Ceci nous amène, d'ailleurs, à examiner les possibilités de l'extrapolation de nos conclusions à la culture d'engrais vert « en dérobée », entre deux plantes d'une rotation de grande culture. Le nombre d'opérations possibles pour assurer le mélange, la masse de sol double ou triple, intéressée, permettent de penser que le système radiculaire jouera un rôle prédominant et, en tout état de cause, que la réussite du mélange aura une importance au moins égale à la masse de matière verte enfouie. D'autre part, la maturité moins grande des végétaux enfouis, le fait qu'il s'agit le plus souvent d'espèces pour lesquelles le rapport poids des tiges/poids des racines est plus élevé que pour le ray-grass italien permettent de penser que les conséquences, tant sur le bilan humique que sur la stabilité structurale, seront encore moins marquées que dans le cas que nous avons étudié. Il est vraisemblable que les améliorations humique et structurale durables, qui peuvent être observées dans certains cas, sur des sols auxquels on fournit régulièrement des engrais verts, proviennent plutôt de l'accroissement des résidus des récoltes lié à des effets autres que ceux que nous avons étudiés ici.

***

Les derniers enseignements que nous tirerons de ce travail sont d'ordre méthologique. Lorsqu'il s'agit de rechercher, d'apprécier et d'expliquer des phénomènes caractérisés par leur faible intensité et de nombreuses variations, la mise en place d'un dispositif expérimental convenable et un échantillonnage approprié et soigneux ne sont pas suffisants.

Pour des phénomènes étroitement liés au temps et aux conditions climatiques, il ne faut pas considérer une mesure isolée dans le temps, mais des courbes établies en fonction du temps. Sinon, on s'expose à faire de grossières erreurs. Par exemple, les augmentations de stabilité étant nulles vers le 70e jour après l'enfouissement, la prise en considération de cette seule mesure aurait conduit à conclure à l'absence d'action de l'engrais vert sur la stabilité structurale.

Il est extrêmement utile de confronter constamment les résultats de mesures concernant des variables différentes (matière organique, stabilité structurale, perméabilité). D'une part, on peut ainsi avancer une explication de certains phénomènes, ou du moins resserrer le champ des explications possibles. D'autre part, la convergence de plusieurs phénomènes, dont le poids individuel serait insuffisant pour conclure, permet souvent d'établir sans ambiguïté la réalité.

L'interprétation des relations entre la matière organique de l'engrais vert et la stabilité structurale n'a pu se faire que grâce aux résultats d'une étude théorique faite en laboratoire (G. MONNIER 1965). Cette étude a recouru à des modèles, un modèle étant un schéma simplifié de la réalité, permettant l'étude des faits essentiels intervenant dans un phénomène. Un bon modèle doit concilier 2 aspects contradictoires, être simple pour permettre son étude et être représentatif de la réalité. Si les phénomènes observés dans le milieu naturel permettent d'établir la validité d'un modèle, réciproquement celui-ci éclaire le phénomène naturel, toujours plus complexe, et permet d'en dégager les grandes lignes.

Reçu pour publication en novembre 1965.

SUMMARY

EFFECT OF A CULTURE OF GREEN MANURE ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF AN ORCHARD SOIL

The effect of a crop of Italian ray grass on the physical properties of a loamy soil reveals itself only after ploughing up the crop. The tilling transformes the plant into a metabolite. The fermentations which take place first at the level of the aerial parts and at then at that of the roots ensure stabilization of the soil structure by means of the transitory products. The soil permeability is thus improved. But these effects do not last and cease when the amount of organic matter of the green manure has almost totally disappeared. This does not seem to have any long term effect on the humic balance.

ZUSAMMENFASSUNG

WIRKUNG EINER GRÜNDUNGÜNGSKULTUR AUF DIE PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DES BODENS EINER OBSTANLAGE

Die Wirkung einer Kultur welschen Weidelgrases auf die physikalischen Eigenschaften eines Lehmbodens machen sich erst nach dem Umbruch fühlbar. Die Bodenbearbeitung macht aus der Pflanze ein Metabolit. Die Fermentationen, die zuerst für die oberirdischen Teile ausgelöst werden. dann für die Wurzeln, sichern eine Stabilisierung der Struktur mittels der Übergangsprodukte Die Boden durchlässigkeit wird dadurch verbessert. Die Wirkungen sind jedoch nur von kurzer Dauer und verschwinden, sobald die fast gesamte organische Masse der Gründüngung verschwun den ist. Es scheint keine Wirkung auf lange Sicht auf die Humusbilanz zu bestehen.

Действие зеленого удобрения на физические свойства почвы садов.

Г. МОННЬЕ и Р. ГРА.

РЕЗЮМЕ

Действие культуры итальянского райграса на физические свойства суглинистой почвы проявляется только после запашки. Действие почвы превращает растение в метаболит. Брожение начинающееся сперва с надземных частей растения и захватывающее затем корневую систему, обеспечивает стабилизацию почвенной структуры, при помощи переходных продуктов. Проницаемость почв немедленно улучшается. Но этот временный эффект проходит, как только исчезает все органическое вещество зеленого удобрения. Долгосрочное влияние на гуммусовый баланс почвы — мало вероятно.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Dosage du carbone organique du sol. *Ann. agron. A*-p. 165.

BAKER C., 1937. Changes in total soil nitrogen under each of several cover crops after 23 years. *Proc. Amer. Soc. hortic. Sci.*, 35.

BARLEY K., 1954. Effect of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam. *Soil. Sci.*, **78**, 205-210.

BENOIT R., WILLITS N. et *al.*, 1962. Effect of a rye winter cover crop on soil structure. *Agron. J.*, **54**, 419-420.

COMBEAU A., QUANTIN P., 1963. Observations sur les variations dans le temps de la stabilité structurale des sols en région tropicale. *Cahier O.R.S.T.O.M.* Pédologie nº 3, 17-26.

GRAS R., 1965. Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. I. Action sur les propriétés physiques du sol. *A paraître Ann. agron*, **6**.

HÉNIN S., TURC L., 1949. Nouvelles observations sur la variation saisonnière de la stabilité structurale du sol. *C. R. Acad. Agric.*, 35.

HÉNIN S., 1944. Influence des corps microbiens sur la formation d'une structure stable.

HÉNIN S., MONNIER G. *et al.*, 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, **9**, 73-92.

MORTENSEN J. YOUNG J., 1960. Effect of summer seeded green manures on soil structure and availability of nitrogen. *Ohio Agric. exper. Sta. Res. Bull.*, nº 865.

MONNIER G., TURC L. *et al.*, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse.

PROEBSTING E., 1952. Some effect of long continued cover cropping in a California orchard. *Proc. Amer. Soc. hortic. Sci.*, 60.

Ann. agron., 1965, **16** (5), 579-593.

OBSERVATIONS SUR LE BORE DANS LE SOL ET DANS LES PLANTES

II. — Influence de l'apport d'amendements calcaires sur le bore préexistant ou ajouté dans le sol

J. MAURICE et S. TROCMÉ

Station centrale d'Agronomie
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise)

SOMMAIRE

La diminution du taux de bore soluble à l'eau des sols et la diminution de l'alimentation en bore des plantes résultant de l'élévation du pH par chaulage peuvent être compensées, pour des périodes prolongées, par des applications de borax au sol, aussi bien pour des terres de réaction initialement acide que pour des terres de réaction voisine de la neutralité. Quelques résultats sont en faveur de l'hypothèse que le chaulage peut conduire à une augmentation propre des besoins en bore des plantes, en plus de celle correspondant à l'augmentation éventuelle des rendements.

INTRODUCTION

En 1937, J. Naftel constatait que l'apport d'amendements calcaires pouvait être à l'origine de symptômes de carences en bore chez diverses plantes cultivées. Par la suite de nombreux travaux ont fait état d'observations semblables, concernant l'influence de chaulages sur l'apparition ou l'aggravation de carences en bore — ou sur l'atténuation ou la disparition de toxicités en cet élément.

Le mécanisme de ces phénomènes, qui reste mal éclairci, a fait l'objet de diverses hypothèses :

On a envisagé d'abord une fixation accrue par les micro-organismes, dont l'activité serait stimulée sous l'influence du chaulage (Naftel, 1937) ; cette hypothèse semble actuellement insuffisante. La précipitation de borates de calcium est improbable, leur produit de solubilité correspondant à des concentrations supérieures à

celles du bore dans les solutions du sol (BARBIER et CHABANNES, 1953 ; SCHARRER et *al.*, 1956). BISHOP et COOK, (1958), ont cependant envisagé la possibilité de formation de métaborate de calcium relativement insoluble. L'adsorption par le calcaire n'a pas été observée (MIDGLEY et DUNKLEE, 1939 ; SCHARRER et *al.*, 1956).

Certaines expériences de laboratoire (PARKS, 1944) ont montré que l'apport de chaux pouvait diminuer la fixation du bore ajouté à un sol ; de même, on a parfois signalé une augmentation du bore assimilable avec le pH (TANADA et DEAN, 1942). Cependant la plupart des auteurs arrivent à des conclusions opposées : l'alcalinisation favoriserait la rétention du bore, au moins si l'on ne dépasse pas des pH de l'ordre de 8-8,5 (cette augmentation de la fixation peut être considérée comme un phénomène favorable dans la mesure où elle est susceptible de régulariser l'alimentation des plantes et où elle s'oppose aux pertes par entraînement, mais défavorable si elle arrive à trop inhiber l'alimentation des plantes). L'influence de l'élévation du pH serait sans relation particulière avec la nature de la base utilisée (OLSON et BERGER, 1946), encore que ce point soit lui aussi discuté, certains auteurs ayant observé une action propre des ions calcium ou magnésium (PHILIPSON, 1953 ; BISHOP et COOK, 1958).

BARBIER et CHABANNES, 1953, ont montré que la fixation du bore, attribuée à l'adsorption de l'ion borique, augmentait avec le pH, entre pH 3 et pH 9, pour une kaolinite et à un moindre degré pour un hydroxyde ferrique, mais qu'elle présentait un minimum à pH 5,2 pour une argile de sol ferrugineuse. Ultérieurement, K. SCHARRER et *al.*, 1956, ont constaté que la rétention du bore était maxima à pH > 8 pour diverses argiles ou pour des oxydes de fer, et à pH 6-7 pour des oxydes d'aluminium. Ces diverses observations permettaient à leurs auteurs de rendre compte dans une certaine mesure des désaccords relevés dans la littérature concernant l'influence de la réaction sur la rétention du bore. Le fait que la fixation du bore par les minéraux argileux soit sous la dépendance du pH supporte l'hypothèse d'une adsorption d'ions borates, ou d'acide borique moléculaire (SCHARRER et *al.*, 1956 ; HINGSTON, 1964).

Les relations entre bore et matière organique du sol, et l'influence du pH à ce sujet, ont été elles aussi l'objet de travaux aux conclusions parfois contradictoires. Selon OLSON et BERGER, (1946), la minéralisation de la matière organique provoque une libération de bore assimilable. D'après PARKS et WHITE, (1952), le bore serait retenu sous forme de complexes par des produits intermédiaires de la décomposition de l'humus (diols), et resterait ainsi temporairement inassimilable. Pour KATALYMOV, (1951), une élévation du pH jusqu'à la neutralité ou l'alcalinité conduirait, en présence de matière organique, à la formation d'esters de l'acide borique relativement stables. Quoi qu'il en soit, il n'est pas exclu que l'élévation du pH conduise à une diminution de l'assimilabilité du bore du sol par l'intermédiaire de phénomènes faisant intervenir la matière organique. Beaucoup d'auteurs s'accordent cependant à reconnaître que l'action sur la fraction minérale des sols doit être prépondérante (cf. SCHARRER et *al.*, 1956).

On a montré d'autre part (DRAKE et *al.*, 1941), notamment à l'aide de cultures en milieux contrôlés, qu'il y aurait également à tenir compte d'une augmentation des besoins en bore lorsque l'absorption de calcium par les plantes augmente (indépendamment de l'accroissement des besoins correspondant à une plus grande production éventuelle de matière végétale). Cette augmentation des besoins correspondrait à une action antagoniste du bore vis-à-vis de troubles dans le métabolisme des glucides

consécutifs au chaulage (STEKLOVA, 1959). Il existerait pour les plantes un rapport calcium/bore optimum, dont la valeur serait d'ailleurs susceptible de varier selon les espèces végétales (JONES et SCARSETH, 1944 ; HASLER et *al.*, 1961). Cependant certains auteurs (ŒRTLI, 1961) considèrent qu'il ne faut pas exagérer l'importance à accorder à ces relations entre calcium et bore (par exemple le rapport calcium/bore de feuilles saines peut varier comme de 1 à 100) ou que leur intérêt ne se manifeste qu'en situations pathologiques (PHILIPSON, 1953).

D'après les données précédentes, on peut craindre que les effets bénéfiques d'un chaulage, qui sont multiples, soient parfois compensés par des effets défavorables, induction ou aggravation de carences en bore — et éventuellement en d'autres éléments-traces —, risquant d'autant plus de se manifester que le pH final est plus élevé. Il n'est pas toujours possible d'adopter une solution moyenne telle que celle conseillée pour les sols humifères de Bretagne (COPPENET, 1956) : ne pas dépasser des pH de l'ordre de 6,2-6,3, pour éviter de provoquer des carences en manganèse trop graves. Cette solution est valable parce que la structure de ces sols est naturellement stable, mais pour d'autres types de sols, il n'est pas recommandé de se maintenir à des pH de cet ordre, qui correspondent à un minimum de stabilité structurale (MONNIER, 1960) ; c'est le cas par exemple de sols dérivés de limon des plateaux décalcarifié, relativement pauvres en argile et riches en limon et sables très fins, facilement battants ; pour conserver une bonne structure, ces sols doivent renfermer un léger excès de calcaire portant leur pH à 8 environ, ce qui risque donc d'induire ou d'aggraver des carences en bore, notamment chez la betterave (les carences en autres éléments-traces, sans être exclues, sont sans doute moins généralement à envisager dans les sols de cette nature).

On conçoit que dans ces conditions la solution la plus valable ne soit sans doute pas de supprimer ou de limiter l'apport d'amendements calcaires, mais plutôt de faire cet apport en veillant à ce que l'alimentation boratée reste convenable ; deux techniques peuvent alors être envisagées principalement :

— apporter du bore aux parties aériennes, par des pulvérisations nutritives ;

— apporter du bore dans le sol avant les semis.

L'apport de bore aux parties aériennes est en général facilement réalisable, par exemple au moyen de pulvérisations de solutions de pentaborate de sodium, beaucoup plus soluble que l'acide borique ou le borax. L'efficacité de pulvérisations de cette nature, comparée à celle d'incorporation de composés boratés dans le sol avant le semis, est cependant encore sujette à discussion : certains auteurs (HAMENCE et ORAM, 1964) ont obtenu des résultats équivalents avec l'une ou l'autre technique, ou parfois supérieurs avec les pulvérisations (en année sèche) ; d'autres au contraire (LUNDBLAD et *al.*, 1956 ; *Pacific Coast Borax Co*, 1955) enregistrent une moins bonne efficacité des pulvérisations, attribuable au fait que le bore, élément peu mobile dans les végétaux, parviendrait mal aux parties souterraines et aux organes difficilement atteints par les pulvérisations, ou au fait que les plantes peuvent avoir déjà souffert d'insuffisance en bore avant les pulvérisations sur le feuillage.

Par contre, on peut se demander si l'application de bore dans le sol, facilement réalisable avec divers types d'engrais (solides ou liquides) ne risque pas d'être inefficace, par suite d'une diminution rapide de l'assimilabilité lorsqu'il y a eu apport d'amendements calcaires. C'est cette question, qui a d'ailleurs déjà fait l'objet de diverses observations, qui sera étudiée et discutée ci-dessous.

A. — TECHNIQUES D'ÉTUDE

L'action et l'interaction d'apports de borax et d'amendements calcaires ont été étudiées à l'aide d'expériences en serre ou en laboratoire.

Pour les expériences en serre, quatre terres ont été utilisées, dont les caractéristiques sont indiquées au tableau 1.

TABLEAU I

Caractéristiques physico-chimiques des terres utilisées

	N°1	N°2	N°3	N°4
Argile	17,1	33,1	17,2	11,7
Limon	21,9	22,4	16,7	21,7
Sable Très fin	40,3	36,1	34,7	33,8
Sable Fin	16,0	6,8	17,6	23,9
Sable Grossier	2,2	0,7	1,7	4,6
Matière organique	2,5	0,9	2,3	4,5
Calcaire	0,0	0,0	9,8	0,0
pH $CaCl_2$ M/100	7,1	7,0	7,6	4,3
Azote °/oo	1,28	0,44	1,15	1,73
p p m B soluble eau	0,45	0,21	0,25	0,55

Le n° 1 est une terre de limon répondant aux propriétés envisagées page 581. Le n° 2 est le sous-sol de 1. Le n° 3 et le n° 4 ont été choisis, le premier à cause de sa teneur en calcaire, le second à cause de sa teneur en matière organique.

Les essais ont été effectués en vases de végétation en polyéthylène, à libre drainage, contenant 10 kg de terre (n° 1) ou 2,5 kg (n° 2, 3 et 4). Les traitements, qui comportaient 4 répétitions, correspondaient à des doses variables de chaux vive ou de borax mélangés à la terre (voir tabl. 3 et 4), la chaux ayant été choisie de préférence au calcaire pour mieux caractériser les phénomènes étudiés. Les applications de chaux ont été faites quelques semaines avant celles de borax, qui précédaient de peu les semis (luzerne, variété *Flamande*). Les pots des séries 2, 3 et 4 ont reçu également 2 g de Krylium en émulsion dans l'eau. En plus d'une fumure de base azotée, phosphatée et potassique, des solutions de sulfate de manganèse, sulfate de zinc, sulfate de cuivre et molybdate d'ammonium étaient appliquées en pulvérisations sur les feuilles à peu près toutes les 3 semaines à partir de la levée, afin de pouvoir considérer comme suffisante dans toutes les situations l'alimentation en oligo-éléments autres que le bore ; cependant on a vu plus haut (p. 581) que cette façon de procéder n'était pas à l'abri de toute critique. L'humidité des pots était ramenée à des niveaux déterminés par des arrosages en surface, le drainage étant pratiquement nul.

Les récoltes correspondant à des coupes successives ont été effectuées à divers stades de végétation pour les essais n° 1 et à des stades identiques pour les essais n° 2, 3 et 4, qui ont été conduits simultanément. Avec la terre n° 1, les essais ont été poursuivis pendant 3 années consécutives sans nouveaux apports d'amendement calcaire ou de borax mais avec renouvellement annuel des semis. Avec les terres n° 2, 3 et 4, les essais n'ont duré que quelques mois.

En plus des rendements et de la teneur en bore de la matière sèche des plantes (1), nous avons suivi les variations du pH ($CaCl_2$ M/100) et du bore soluble à l'eau bouillante des sols (2). Le bore soluble à l'eau bouillante ne saurait bien entendu être considéré comme reflétant à lui seul, en toutes situations, l'aptitude des sols à alimenter en bore les plantes cultivées. Divers auteurs ont montré qu'on pouvait n'observer, dans une même région, aucune relation satisfaisante entre les teneurs en bore soluble et, par exemple, la manifestation ou la gravité des symptômes de carence en bore

(1) bore total des végétaux, *ann. Agron.* 1965, n°3, p. 290.
(2) bore soluble à l'eau des sols (avec rapport terre/eau = 1/5), *Ann. agron.* 1965, n°3, p. 294.

sur betteraves (HAMENCE et ORAM, 1964). De fait, l'utilisation pratique de la connaissance du bore soluble à l'eau bouillante dans la prévision d'insuffisances ou d'excès d'alimentation se heurte à un certain nombre de difficultés, notamment :

— On sait que l'absorption par les plantes est réduite en milieu soumis à des conditions de sécheresse, en sorte que des carences en bore peuvent être observées même si la teneur en bore soluble du sol est élevée (HOBBS et BERTRAMSON, 1949).

— La teneur en bore soluble est susceptible de varier au cours de l'année, parfois de plus de 500 p. 100 (libération de bore par élévation de la température (WINSOR, 1952) ; fixation accrue sous l'influence d'alternances d'humidité et de sécheresse favorisant la pénétration dans la charpente des argiles (BIGGAR et FIREMAN, 1960) ; les conditions d'un été humide sont celles pouvant conduire à un maximum de la teneur en bore soluble).

Il n'en demeure pas moins — et nous y reviendrons plus loin — que la détermination du bore soluble à l'eau bouillante permet d'établir des comparaisons valables de l'alimentation boratée de plantes soumises par ailleurs aux mêmes conditions de milieu. C'est ainsi que STEWART et *al.* (1956), qui n'avaient pas constaté de corrélation satisfaisante entre la teneur en bore soluble des sols et la teneur en bore de luzernes cultivées en plein champ, au cours d'une période estivale sèche, ont trouvé une bonne corrélation en effectuant des expériences en serre poursuivies dans des conditions d'humidité convenables.

B. — RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1° *Étude au laboratoire de l'évolution du bore soluble à l'eau des sols*

L'influence de l'apport d'amendement calcaire sur l'évolution du bore soluble à l'eau a été étudiée au laboratoire sur une terre de limon (17 p. 100 d'argile), maintenue à la température ambiante et à un taux d'humidité de 18 p. 100. Juste avant incorporation de calcaire, une partie de la terre a été enrichie en bore, par agitation mécanique en présence d'une solution d'acide borique.

TABLEAU 2

Évolution du bore soluble à l'eau avec le temps

	$CaCO_3$ en g/kg sol	0 jour		21 jours		107 jours		204 jours	
		ppm B	pH	ppm B	pH	ppm B	pH	ppm B	pH
Terre initiale	0	0,55	6,5	0,60	6,5	0,69	6,4	0,65	6,5
	2,33	0,38	7,1	0,36	7,1	0,41	7,2	0,39	7,2
Terre initiale enrichie en B	0	1,56	6,5	1,51	6,5	1,58	6,4	1,54	6,5
	2,33	1,25	7,1	1,12	7,1	1,17	7,2	1,14	7,2

Le tableau 2 enregistre, après apport de calcaire, une diminution rapide du bore soluble, correspondant elle-même à une élévation caractérisée du pH. Ensuite le bore soluble varie peu dans la mesure où le pH lui-même varie relativement peu, et la teneur de la terre chaulée et boratée reste supérieure à celle de la terre témoin sans apport de chaux ni de bore.

2° Bore soluble à l'eau des sols cultivés en vases de végétation

Les teneurs en bore soluble ont été déterminées au début des expériences, et juste après la dernière coupe, c'est-à-dire plusieurs mois après les applications de chaux ou de bore (tabl. 3 et 4) :

TABLEAU 3

Terre n° 1. — *Influence de la chaux et du borax sur la teneur en bore soluble*
(en ppm sol)

CaO en g/kg sol.	0	1,2	3,0
pH	6,9	7,2	7,5
Borax en mg/kg sol			
0	0,39	0,33	0,27
10	0,86	0,65	0,58
20	1,48	1,20	1,05
40	2,51	—	—

TABLEAU 4

Terres n°s 2, 3 et 4. — *Influence de la chaux et du borax sur la teneur en bore soluble*
(en ppm sol)

N° de la terre	2		3		4	
CaO en g/kg sol	0	1,6	0	1,6	0	1,6
pH	6,8	7,6	7,5	7,6	4,4	5,8
Borax en mg/kg sol						
0	0,19	0,11	0,23	0,21	0,51	0,40
20	1,46	1,09	0,88	0,81	1,71	1,26

— A dose égale de borax appliqué, les teneurs en bore soluble sont toujours plus faibles avec apport de chaux, en relation avec les variations du pH (diminution d'autant plus accusée que la dose de chaux a été plus élevée : tableau 3 ; diminution faible en sol calcaire où la chaux n'entraîne qu'un faible relèvement du pH : tableau 4)

— L'apport de borax a maintenu un taux de bore soluble élevé, même en sol calcaire.

— Là où il y a eu apport d'amendement calcaire, des apports de borax (équivalents à 30 ou 60 kg par 3 000 tonnes de terre) ont permis, malgré l'élévation du pH, de maintenir les taux de bore soluble à des niveaux supérieurs à ceux obtenus sans apport de bore ni de chaux, bien que la proportion de bore provenant du borax retrouvée sous forme de bore soluble à l'eau bouillante soit alors inférieure à celle enregistrée en l'absence de chaulage.

Les différences dans les prélèvements de bore par les récoltes selon les traitements ne peuvent pas être considérées comme ayant influé sur le sens de ces résultats.

Les valeurs indiquées représentent des valeurs moyennes qui n'excluent pas une certaine hétérogénéité du milieu, notamment en ce qui concerne la répartition du bore là où du borax a été appliqué, et même après des brassages répétés. De fait, on peut enregistrer des coefficients de variation de 50 p. 100 pour des prélèvements de quelques grammes effectués à l'intérieur d'un même pot.

L'ensemble de ces déterminations permet *a priori* de conclure qu'on peut remédier à la diminution de l'alimentation boratée consécutive au chaulage par des applications de borax à doses relativement modérées. Cela suppose cependant que le bore soluble, même en milieu relativement hétérogène, constitue une bonne estimation de l'aptitude des terres à alimenter en bore les cultures. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de considérer également la réaction des plantes.

3° *Rendements en matière sèche*

Les rendements en matière sèche sont indiqués dans les tableaux 5, 6, et 9 ; le tableau 5 ne fait pas état des premières coupes.

TABLEAU 5

Terre n° 1. — *Rendements en matière sèche de la luzerne* (en g par pot).

CaO en g/kg sol	0	1,2	3,0
Borax en mg/kg sol			
0	74,0	77,8	80,9
10	69,6	78,2	79,2
20	71,3	77,4	83,5
40	74,8	—	—

TABLEAU 6

Terres n°s 2, 3 et 4. — *Rendements en matière sèche de la luzerne* (en g par pot)

N° de la terre	2		3		4	
CaO en g/kg sol	0	1,6	0	1,6	0	1,6
Borax en mg/kg sol						
0	4,4	5,5	8,9	9,6	6,4	13,2
20	4,3	4,8	7,7	9,9	5,6	14,6

L'effet de la chaux a été positif ($P < 0,05$) sur le sol n° 4, et, pour quelques coupes, sur le sol n° 1. Par contre, sur ce dernier sol, l'effet de la chaux a été nettement dépressif, particulièrement à haute dose, pour la première coupe (tabl. 9, voir plus loin).

Sur aucun des sols étudiés, l'apport de borax seul n'a eu d'action sur les rendements de la luzerne (les effets légèrement dépressifs montrés par les tableaux 5 et 6 ne sont pas significatifs).

Avec chaux, l'application de borax a eu une action positive significative sur le sol n° 4. Sur le sol n° 1, l'application des plus fortes doses de chaux et de bore a procuré le rendement maximum (significativement supérieur à tous les autres pour 2 coupes).

Aucun symptôme de carence ou de toxicité en bore n'a été observé.

4° *Teneurs en bore de la matière sèche et prélèvements des récoltes* (tabl. 7 et 8)

L'application de borax a toujours augmenté de façon importante les teneurs en bore de la matière sèche de la luzerne, même en sol calcaire.

TABLEAU 7

Terre n° 1. — *Influence de la chaux et du borax sur la teneur en bore de la matière sèche de la luzerne*

(en ppm)

CaO en g/kg sol	0	1,2	3,0
Borax en mg/kg sol			
0	59,9	52,7	48,1
10	83,3	76,6	73,9
20	98,3	94,6	94,6
40	137,1	—	—

TABLEAU 8

Terres n°s 2, 3 et 4. — *Influence de la chaux et du borax sur la teneur en bore de la matière sèche de la luzerne*

(en ppm)

N° de la terre	2		3		4	
CaO en g/kg sol	0	1,6	0	1,6	0	1,6
Borax en mg/kg sol						
0	39,3	39,1	35,6	28,6	46,1	33,8
20	64,1	61,5	58,4	57,7	83,9	64,6

A dose égale de borax appliquée, l'apport de chaux a conduit à une diminution en général significative des teneurs en bore de la matière sèche. Cependant l'application de borax à doses relativement modérées a permis, pour chacune des coupes

successives, de maintenir ces teneurs à des niveaux supérieurs à ceux des plantes cultivées sans chaux ni bore.

Les observations suivantes peuvent également être présentées :

a) sur la terre nº 1, à pH 6,9, un taux de bore soluble de 0,39 p.p.m. a permis d'obtenir le rendement maximum (pour des taux plus élevés, la teneur en bore de la matière sèche augmente, mais les rendements n'augmentent pas) ; à pH 7,5, le rendement maximum (significatif pour 2 coupes) n'est obtenu que pour un taux de bore soluble supérieur à 0,60 p.p.m.

Ces données sont en accord avec le fait que l'on considère en général qu'il y a lieu de tenir compte du pH pour interpréter les indications fournies par la détermination du bore soluble à l'eau des sols. Par exemple, JOUIS et *al.* (1960) observent des symptômes de carence en bore sur betterave ou lin si les taux de bore soluble sont inférieurs à 0,1 p.p.m. à pH 6,8 — et inférieurs à 0,9 p.p.m. à pH 7,5, pour des sols de même type dont les différences de pH sont imputables à des chaulages.

On peut faire à ce sujet les hypothèses suivantes :

α) La relation entre bore soluble à l'eau d'un sol donné et bore utilisable par les plantes dépendrait du pH. C'est ainsi que WEAR et PATTERSON (1962) montrent qu'il existe entre le taux de bore soluble d'un sol et la teneur en bore de la matière sèche de la luzerne en vases de végétation une relation sensiblement linéaire, dont le coefficient angulaire varie avec le pH. Cette variation est surtout accusée en sol sableux initialement acide, mais l'est relativement peu en sol de limon ne supportant que des variations de pH modérées.

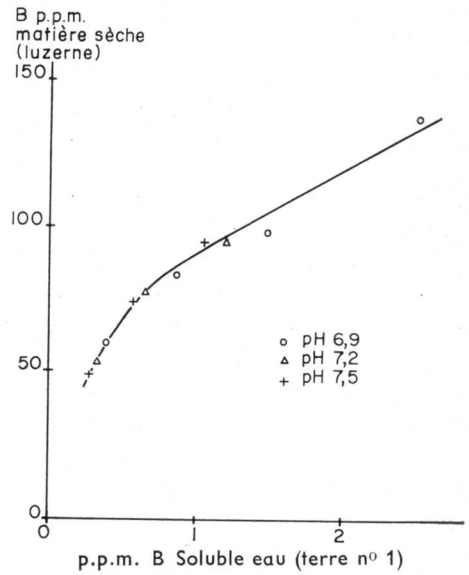


FIG. 1. — *Relation entre taux de bore soluble et teneur en bore de la matière sèche*

Dans les sols expérimentés, et pour les variations de pH considérées, il ne nous est pas apparu que l'on puisse mettre en évidence une influence caractérisée du pH sur les relations entre taux de bore soluble du sol et teneur en bore des plantes (fig. 1 et 2). Autrement dit, à une teneur donnée en bore soluble du sol correspondait

sensiblement une teneur en bore des plantes déterminée, quel que fût le pH auquel était porté le sol considéré.

β) A la suite du chaulage, les besoins des plantes en bore augmenteraient, comme envisagé plus haut page 580 (plus que proportionnellement aux rendements si le chaulage conduit à une augmentation des rendements). Effectivement à pH 6,9 (terre nº 1), les rendements ne varient pas, quelle que soit la teneur en bore de la matière sèche entre 60 et 137 p.p.m. ; par contre à pH 7,5, la teneur de 74 p.p.m. ne correspond pas au rendement maximum, obtenu ici pour 95 p.p.m.

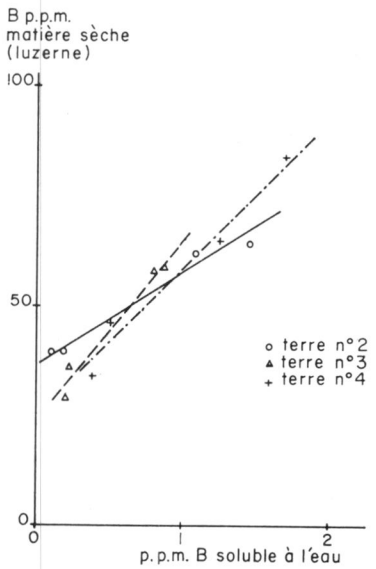


FIG. 2. — *Relation entre taux de bore soluble et teneur en bore de la matière sèche*

b) La relation entre bore soluble des sols et bore des plantes dépend du type de sol (fig. 2), en accord avec diverses observations (WEAR et PATTERSON, 1962).

c) Sur la première coupe de luzerne (terre nº 1), on observe un effet nettement dépressif des apports de chaux, lesquels avaient été effectués très peu de temps avant le semis (tabl. 9). Ces résultats ne peuvent être imputés à une absorption insuffisante

TABLEAU 9

Terre nº 1. — *Influence de la chaux et du borax sur la 1ère coupe*

CaO en g/kg sol	0				1,2			3,0		
Borax en mg/kg sol	0	10	20	40	0	10	20	0	10	20
Matière sèche en g/pot p.p.d.s. = 0,8	7,2	6,7	6,5	7,4	6,4	5,9	6,6	2,7	2,9	2,8
p.p.m. B. de la matière sèche p.p.d.s. = 9,9	60,7	79,5	104,7	163,6	48,2	67,9	70,9	49,2	60,3	69,6

de bore, comme le montre l'augmentation des teneurs en bore de la matière sèche dans les terres boratées. D'autre part, des applications foliaires d'oligo-éléments autres que le bore ont été effectuées régulièrement et aucun symptôme pathologique de carence n'a été constaté, malgré la diminution importante de rendement. Les effets dépressifs observables lorsque les semis suivent de trop près l'enfouissement de chaux vive n'apparaissent donc pas comme pouvant être mis uniquement en relation avec la fourniture d'éléments traces.

C. — CONCLUSIONS

1° Les apports de chaux ou de calcaire ont provoqué, en relation avec l'élévation du pH, une diminution du taux de bore soluble à l'eau des sols (cf. BISHOP et COOK, 1958). Cette diminution a été obtenue aussi rapidement que la modification du pH. Par la suite le taux de bore soluble a peu varié, dans la mesure où le pH du sol variait lui-même peu, et en l'absence de prélèvements par les plantes ou de lessivages importants.

Le chaulage a également diminué la fraction de bore (apporté sous forme de borax) retrouvée sous forme de bore soluble à l'eau chaude.

On peut noter que les terres étudiées renferment toutes un pourcentage notable d'argile. Avec une terre sableuse, pauvre en matières organiques, LEHR (1962) n'a enregistré aucune diminution du taux de bore soluble après un apport de calcaire, qu'il y eût du bore ajouté antérieurement ou non, même après plusieurs mois ; il retrouvait d'ailleurs à peu près intégralement le bore soluble ajouté au sol, aussi bien en l'absence qu'en présence de calcaire.

D'autre part, le taux de bore soluble a permis de rendre compte valablement des conditions d'alimentation en bore, ainsi que le montre l'examen des relations entre la teneur en bore soluble des sols et la teneur en bore de la matière sèche ou les prélèvements des plantes (luzerne). Ces relations varient avec la nature des sols examinés (cf. également WEAR et PATTERSON, 1962).

En définitive, l'augmentation du pH par chaulage a été à l'origine d'une diminution de la fourniture de bore assimilable ; cela ne permet cependant pas d'exclure que des insuffisances en bore ne soient pas dues également à une augmentation propre des besoins des plantes à la suite de chaulages, en plus de celle correspondant à l'augmentation éventuelle des rendements (cf. p. 580) ; quelques résultats présentés permettent de supporter cette hypothèse.

2° Le bore apporté au sol sous forme de borax a toujours augmenté l'absorption du bore par les plantes, même en sol calcaire, en accord avec d'autres observations (NORLAND et STAROTSKA, 1960). Après chaulage, on a généralement toujours enregistré une action significative du bore appliqué dans le sol, ce qui a permis de compenser, pour des périodes de plusieurs mois au moins, l'effet défavorable sur l'alimentation boratée dû à l'élévation du pH, aussi bien pour des terres de réaction initialement acide que pour des terres de réaction voisine de la neutralité.

L'examen de la littérature consacrée au bore permet de retrouver des résultats de même sens (DRAKE et SIELING, 1941 ; JONES et SCARSETH, 1944 ; BAKER et COOK, 1959 ; JOUIS et *al.*, 1960 ; NORLAND et STAROTSKA, 1960).

Si dans les conditions de la pratique agricole on effectue un chaulage de redressement modifiant nettement et rapidement le pH de terres sujettes aux carences en bore, l'application de doses de borax égales à celles que l'on apporterait sans chaulage risque d'être insuffisante : d'une part les conditions d'alimentation en bore seront moins bonnes que si la même quantité de borax était apportée en l'absence de chaulages, et d'autre part les besoins en bore auront peut-être augmenté. C'est ainsi que JOUIS et *al.* (1960), ont pu observer des carences en bore en terres chaulées et boratées, sans doute parce que les applications de bore, aux doses ordinaires, étaient insuffisantes. Il est donc alors concevable de prévoir des doses de bore supérieuresaux doses normales, en restant dans les limites raisonnables pour éviter tout risque de toxicité.

En présence de terres qui, avant chaulage, ne réagissent pas à l'apport de bore (telles que celles étudiées dans nos essais), la diminution de l'approvisionnement en bore des plantes après chaulage, conjuguée à l'augmentation possible de leurs besoins, risque de conduire dans certains cas à des insuffisances en bore (se manifestant éventuellement par des symptômes de carence). L'application de borax permet de remédier à cet effet défavorable du chaulage. C'est ainsi que dans 2 des terres étudiées, le chaulage seul n'a pas permis d'atteindre le rendement maximum : celui-ci n'a été obtenu que s'il y avait à la fois chaulage et application de borax, bien qu'on n'observât aucun symptôme de carence après chaulage seul.

Dans tous les cas, on sait qu'il y aura ensuite danger d'accumulation toxique s'il y a application répétée de doses substantielles de bore (BARBIER et CHABANNES, 1953).

Il serait théoriquement possible de déterminer au laboratoire les quantités de bore à ajouter à un sol pour que le taux de bore soluble atteigne après chaulage une valeur donnée. Il est vraisemblable cependant que l'interprétation d'une telle détermination se heurterait à des difficultés comparables à celles que présente également l'appréciation du besoin en chaux réel.

D'autre part on n'est pas toujours en mesure actuellement de préciser pour les différents types de sols les teneurs en bore soluble souhaitables. On peut cependant rappeler ici les indications fournies par E. JOUIS et *al.* (1960), qui ont pu établir pour des sols de limon du pays de Caux une relation entre la teneur en bore soluble et le seuil d'apparition de symptômes de carences en bore sur betterave ou sur lin, en fonction du pH.

Mais il est par ailleurs bien connu que différents autres facteurs (conditions climatiques notamment) sont susceptibles d'intervenir dans l'alimentation boratée des cultures, qui demeure difficile à prévoir d'après l'analyse du sol.

Quoi qu'il en soit, on sait qu'il n'est pas toujours possible de remédier par des applications dans le sol aux insuffisances éventuelles de certains éléments traces induites par les chaulages. C'est le cas par exemple du manganèse, dont l'application de sels ou d'oxydes reste en général inefficace, sauf à doses extrêmement élevées (plusieurs centaines de kg par ha), ou du zinc, lorsqu'il s'agit de guérir ou de prévenir des carences sur lin. En ce qui concerne le bore, l'application dans le sol apparaît au contraire comme une mesure qui peut être valablement retenue. Cependant on conçoit que les pulvérisations sur les parties aériennes soient aussi parfois à envisager, étant donné que l'appréciation des doses à apporter, qu'il y a lieu de maintenir dans des limites excluant les risques de toxicité, reste sujette à une certaine imprécision.

Reçu pour publication ***en*** *juin* 1965.

SUMMARY

OBSERVATIONS ON THE BORON IN SOILS AND PLANTS

II. — INFLUENCE OF A LIMING ON THE PRE-EXISTENT OR ADDED BORON IN THE SOIL

Limings have caused, in relation with an elevation of the pH, a decrease of the water soluble boron. This decrease took place as fast as the modification of the pH.

The boron added to the soil, as borax, increased in each case the rate of water soluble boron, even in calcareous soils.

After liming, the boron added to the soil has always increased significantly the water soluble boron or the boron nutrition of the plants, which allowed, for periods of a few months at least, to compensate for the unfavourable effect due to the elevation of the pH, as well for soils with initially acid reactions as for those with neutral reactions.

The ratio of water soluble boron allowed to give a valid account on the conditions of the boron nutrition of plants on soils submitted to various treatments (liming, borax fertilizers) and kept in appropriate moisture conditions (vegetation vases).

Next to the decrease of assimilable boron as a consequence of the liming, boron deficiencies may also come from an increase of the needs in boron of the plants (next to that corresponding to an eventual increase of the yields). A few results presented here allow to support this supposition.

ZUSAMMENFASSUNG

BEOBACHTUNGEN ÜBER BOR IM BODEN UND IN DEN PFLANZEN

II. — EINFLUSS EINER KALKUNG AUF DAS DEM BODEN ZUGEFÜGTE ODER VORHANDENE BOR

Kalkgaben führten, in Verbindung mit einem Anstieg des pH, zu einer Verringerung des im Wasser löslichen Bors. Diese Verringerung ging ebenso rasch vor sich, wie die Veränderung des pH.

Das in Form von Borax zugeführte Bor erhöhte in jedem Fall die Rate des im Wasser löslichen Bors, selbst in Kalkböden.

Nach Kalken erhöhte das dem Boden zugeführte Bor signifikant den Gehalt an im Bodenwasser löslichen Bor, auch die Borernährung der Pflanzen, was für mehrere Monate die ungünstige Wirkung des pH-Anstiegs auszugleichen ermochte, sowohl für Böden mit ursprünglich saurer als für solche mit neutraler Reaktion.

Durch die Rate des im Bodenwasser löslichen Bors konnte man die Boraufnahme durch die Pflanzen in Böden, die verschiedenen Behandlungen unterworfen (Kalkung, Boraxgaben) und unter günstigen Feuchtigkeitsbedingungen gehalten wurden (Vegetationsgefässe) einigermassen feststellen.

Ausser der Verringerung des assimilierbaren Bors nach Kalkung kann Bormangel auch von erhöhten Ansprüchen seitens der Pflanzen herrühren (ausser denjenigen, die von einer evtl. Erhöhung der Erträge herrühren). Einige dargestellte Ergebnisse könnten diese Annahme unterstützen.

Влияние известкования на ранее существовавший в почве или принесенный в нее бор.

Ж. МОРИС и С. ТРОКМЭ. — Версаль.

РЕЗЮМЕ

Известковые подкормки вызвали, в соответствии с увеличением pH, уменьшение количеств растворимого в почвенных водах бора, при чем, уменьшение это достигалось с той-же быстротой что и изменение pH.

Бор, принесенный в почву в форме Боракса, всегда увеличивал количества водорастворимого бора почв, даже в почвах известковых.

Обработка бором после известкования всегда в значительной мере увеличивала содержание растворимого в почвенных водах бора, иначе говоря, борное питание растений; это разрешало сглаживать отрицательный эффект, вызванный увеличением pH, как в почвах с начальной кислой реакцией, так и в почвах с реакцией более или менее нейтральной, в продолжении периодов в несколько месяцев, минимум.

Исчисление количеств водорастворимого бора позволило авторам создать себе полное представление об условиях борного питания растений в почвах подвергнутых различного способа обработкам (известкование, подкормки Бораксом), и поддерживавшихся в подходящих условиях влажности (вегетационные сосуды). Кроме случая уменьшения доставки растениям усвояемого бора, борная недостаточность может также зависеть от увеличения потребности растений в этом элементе (вне зависимости от количеств соответствующих возможному увеличению урожайности). Несколько результатов предлагаемых авторами дают некоторое обоснование этой гипотезе.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BAKER A., COOK R., 1959. Greenhouse studies on alfalfa with soil type, soil reaction and borax fertilization as variables. *Agron. J.*, **51**, 1-4.

BARBIER G., CHABANNES J., 1953. Contribution à l'étude du bore dans le sol et dans les plantes. *Ann. agron.*, **23**, 27-43.

BIGGAR J., FIREMAN M., 1960. Boron adsorption and release by soils. *Soil. Sci. Soc. amer. Proc.*, **24**, 115-19.

BISHOP R., COOK R., 1958. Laboratory and greenhouse studies on effect of lime and other amendments on water soluble boron in soils. *Canad. J. Soil Sci.*, **38**, 1-27.

COPPENET M., 1956. En Bretagne, deux oligo-éléments d'importance. *Bull. techn. Inf. Ingrs. Serv. agric. Fr.*, **108**, 155-63.

DRAKE M. et *al.*, 1941. Calcium-boron ratio as an important factor in controlling the boron starvation of plants. *J. amer. Soc. Agron.*, **33**, 454-62.

HAMENCE J., ORAM P., 1964. Effects of soil and foliar application of sodium borate to sugar beet. *J. Sci. Food Agric.*, **15**, 565-79.

HASLER A. et *al.*, 1961. Über die Boraufnhame und das Kalzium-Boron Verhältnis in verschiedenen Futterleguminosen. *Schweiz. Landw. Monatsh.*, **39**, 2-15.

HINGSTON J., 1964. Reactions between boron and clays. *Austr. J. Soil Res.*, **2**, 83-95.

HOBBS J., BERTRAMSON B., 1949. Boron uptake by plants as influenced by soil moisture. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **14**, 257-61.

JONES H., SCARSETH G., 1944. The calcium-boron balance in plants as related to boron needs. *Soil Sci.*, **57**, 15-24.

JOUIS E. et *al.*, 1960. Influence du pH sur la carence en bore des betteraves et des lins dans les sols de limon du pays de Caux. *C. R. Acad. Agric.*, **46**, 248-52.

KATALYMOV M., 1951. Causes of decreased availability of boron to plants after liming of soil. *Doklady Akad. Nauk S.S.S.R.*, **76**, 863-6.

LEHR J., 1962. Der Bor Versorgungsgrad holländisher Böden. *Landw. Forsch. Sonderheft*, **16**, 72.

LUNDBLAD K. et *al.*, 1956. Results of swedish field trials. *Kungl. Lantbruks högskolen Bull.*, **63**.

MIDGLEY A., DUNKLEE D., 1939. The effect of lime on the fixation of borates in soils. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **4**, 302-7.

MONNIER G., 1960. La structure du sol. *Techniques agricoles* 1, fasc. 1140.

NAFTEL J., 1937. The relation of boron deficiency to over-liming injury. *J. amer. Soc. Agron.*, **29**, 761-71.

NORLAND M., STAROTSKA R., 1960. Response of alfalfa to boron fertilization of Sundry acid and calcareous soils in a greenhouse study. *Agron. J.*, **52**, 33-35.

ŒRTLI J., 1961. Der Einfluss von Kalium und Calcium auf die Borernährung von Pflanzen. *Z. Pflanzenernähr.*, **94**, 1-8.

OLSON R., BERGER K., 1946. Boron fixation as influenced by pH, organic matter content and other factors. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **11**, 216-20.

Pacific Coast Borax Co, 1955. *Summary response of cooperative borate fertilizer tests.*

PARKS R., 1944. The fixation of added boron by Dunkirk fine sandy loam. *Soil Sci.*, **57**, 405-16.

PARKS W., WHITE J., 1952. Boron retention by clay and humus systems. *Proc. Soil Sci. Soc. Agron.*, **16**, 298-300.

PHILIPSON T., 1953. Boron in plant and soil. *Acta agric. scandin.*, **3**, 121-242.

SCHARRER K. et *al.*, 1956. Untersuchungen über die Bindung des Bors durch anorganische Bodenbestandteile. *Z. Bodenkalt. Pflanzenernähr.*, **73**, 40-48.

STEKLOVA M., 1959. Investigation on the physiological effect of boron. *Trudy Bot. Inst. Komarova Akad.*, **13**, 329-60.

STEWART F., AXLEY J., 1956. Seasonal variation in the boron content of alfalfa. *Agron. J.*, **48**, 6, 259-62.

TANADA T., DEAN L., 1942. Boron in some Hawaiian soils and crops. *Hawaiian Planter's Record*, **46**, 65-74.

WEAR J., PATTERSON R., 1962. Effect of soil pH and texture on the availability of water-soluble boron in the soil. *Soil Sci. Soc. amer. Proc.*, **26**, 4, 344-6.

WINSOR H., 1952. Variations in soil boron with cultivation and season. *Soil Sci.*, **74**, 359-364.

Ann. agron., 1965, **16** (5), 595-598.

CHRONIQUE DES LIVRES

HALLSWORTH (E. G.) and CRAWFORD, (D. V.) ed. — EXPERIMENTAL PEDOLOGY. — London, Butterworth, 1965, 414 p.

Les comptes rendus du « Symposium de Pédologie expérimentale » qui s'est déroulé à Nottingham en mars 1964 ont été rassemblés et édités par E. G. HALLWORTH et E. V. CRAWFORD sous forme d'un volume de 414 p. Les articles sont regroupés par affinité en sections et les discussions relatives aux communications d'une même section sont résumées, très explicitement d'ailleurs, à la fin de chacun des grands paragraphes.

En voici le détail :

I. — *Géochimie et altération des minéraux du sol* (p. 3-99).
— J. J. FRIPIAT : Chimie de surface et science du sol.
— W. D. EVANS : Études de géochimie organique.
— S. HÉNIN et G. PEDRO : L'altération des roches au laboratoire .
— J. RAUSELL-COLOM et *al.* : Étude sur l'altération artificielle des micas.
— R.M.S. PERRIN : L'utilisation des analyses des eaux de drainage pour l'étude des sols.

II. — *Redistribution des substances minérales* (p. 99-179).
— S. CAILLÈRE et S. HÉNIN : La formation des minéraux argileux à basse température.
— J. VAN SCHUYLENBORGH : La formation des sesquioxydes dans les sols.
— D. ACQUAYE et J. TINSLEY : La silice soluble dans les sols.
— D. GUNARY et *al.* : Étude expérimentale de la mobilité des ions dans le sol avec référence particulière pour le phosphore.
— D. H. YAALON : Mouvement descendant et distribution des anions dans les profils aux humidités limitées.
— C. B. WELLS : La formation des concentrations de carbonate de calcium.

III. — *Aspects biologiques de la formation des sols.*

a) Action des matières végétales (p. 179-219).
— R. BÉTRÉMIEUX et S. HÉNIN : Développement de profils artificiels par décomposition de matière végétale.
— N. A. BURGES : Processus biologiques de la décomposition des matières organiques.
— D. S. JENKINSON : Décomposition dans le sol de matières végétales bien déterminées.
— J. D. OVINGTON : Cycle des éléments nutritifs sous forêts.

b) Action de l'activité animale (p. 219-257).
— G. V. JACKS : Le rôle des organismes dans les premiers stades de la formation des sols.
— J. VAN DERDRIFT : Effet de l'activité animale sur la litière.
— G. W. HEATH : La part des animaux dans la formation des sols.
— C. JEANSON et G. MONNIER : Études sur la stabilité structurale du sol. Importance des modèles et rôle de la faune du sol.

IV. — *Études de pédogenèse* (p. 257-377).
— C. BLOOMFIELD : Matière organique et dynamique du sol.
— D. V. CRAWFORD : Quelques études sur la formation des podzols.
— V. B. PROUDFOOT : Étude du développement des sols à partir des travaux de terrassement (construction et excavation).
— T. W. WALKER : Signification du phosphore en pédogenèse.
— D. G. Mac KINLAY : Études physiques sur les phénomènes de transport et de dépôt fluvial.
— H. P. BLUME et E. SCHLICHTING : Relations entre la pédologie historique et la pédologie expérimentale.
— E. G. HALLSWORTH : Relations entre la pédologie expérimentale et la classification des sols.

V. — *Démonstrations* (p. 377-391).
— W. D. Evans : Pyrochromatographie.
— J. F. Ainsworth et D. V. Crawford : Méthode pour l'étude d'un profil de sol comportant un plan d'eau.
— E. B. Pantastico et T. I. Ashaye : Démonstration sur l'influence d'un niveau rocheux sur le transport du sol.

En définitive, recueil complet des études de pédologie expérimentale, qui permet de faire le point des données acquises actuellement au laboratoire sur les processus de la pédogenèse.

G. P.

Bould (C.), Prévot (P.) and Magness (J. R.), ed. — Plant analysis and fertilizer problems. IV. — East Lansing (Michigan), *Amer. Soc. hortic. Sci.*, 1964, 430 p.

Ce volume contient les Comptes rendus du 4e Colloque sur « l'analyse des plantes et les problèmes des engrais minéraux », qui s'est tenu à Bruxelles en septembre 1962, en liaison avec le 16e Congrès international d'Horticulture.

Trente et un rapporteurs, de 13 pays différents, ont présenté des rapports au cours de 7 sessions présidées respectivement par : W. Reuther (U.S.A.), P. Prévot (France), C. O. Tamm (Suède), F. Steenbjerg (Danemark), R. L. Mitchell (Écosse), R. M. Samish (Israël) et C. Bould (Angleterre).

Duchaufour (Ph.). — Précis de pédologie. Paris, Masson, (2e éd.) 1965, 482 p.

M. Duchaufour nous présente ici une 2e édition entièrement refondue de son « Précis de Pédologie ».

L'ouvrage est divisé en 3 grandes parties.

La première partie traite des « Propriétés des Sols » et constitue une excellente mise au point des questions concernant la Science du Sol en général, avec les chapitres classiques suivants : Constituants des sols, Physique du sol (texture, structure, eau et sol), Chimie du sol (phénomènes d'échange d'ions et dynamique des cations échangeables, propriétés électro-ioniques, comportement des éléments fondamentaux de la pédogenèse Fe, Al et des oligoéléments), Biochimie du sol (constitution de la matière organique des sols, mode d'évolution, classification des humus).

La deuxième partie est consacrée entièrement aux « phénomènes pédologiques » (genèse, évolution et classification des sols). Le point le plus nouveau concerne la systématique des sols avec une étude critique de la classification américaine de 1960 (7e approximation) et une présentation détaillée de la classification française (Gand, 1962).

L'auteur aborde ensuite l'examen détaillé de chaque type de sol dans l'ordre du système français, mais indiquant les caractéristiques suivant la nomenclature américaine : sols bruts, sols à complexe saturé (Mollisols et Vertisols), sols à mull (s. bruns et lessivés), Sols à Mor (s. podzoliques), sols hydromorphes (Gley et pseudogley), sols à sesquioxydes (s. ferrugineux méditerranéens et tropicaux, sols ferrallitiques), sols halomorphes.

Enfin, la troisième partie est constitutée par l'étude d'un certain nombre de problèmes de « Pédologie appliquée », en particulier conservation des sols, lutte contre l'érosion et cartographie des sols.

Excellent ouvrage de synthèse avec des aspects nouveaux, surtout en ce qui concerne la classification des sols et la comparaison méthodique des deux grands systèmes utilisés de nos jours en Pédologie.

G. P.

Mitchell (R.L.). — The spectrochemical analysis of soils, plants and related materials. — Harpenden, Commonwealth Bureau of Soils, Technical Communication nº 44 A, 1964, 225 p.

Cet ouvrage constitue une réimpression de la Communication technique nº 44, publiée en 1948. Le texte original a été repris sans modification, mais l'auteur y a ajouté un addendum qui met à jour la description des méthodes utilisées au *Macaulay Institute for Soil Research*, et un index qui facilitera la consultation de l'ouvrage.

SCHUURMAN (J. J.) and GOEDEWAAGEN (M.A.J.). — METHODES FOR THE EXAMINATION OF ROOT SYSTEMS AND ROOTS (Méthodes d'examen des systèmes racinaires et des racines). — Wageningen, Centre for agricultural publications and documentation, 1964, 186 p.

L'objectif de ce livre, en matière d'études de racines, se limite à des recherches morphologiques. Il rassemble les données recueillies sur les caractéristiques morphologiques suivantes :

1° *la quantité totale des racines* : elle fournit une indication sur la capacité d'absorption du système racinaire en relation avec son extension morphologique. Cette quantité totale de racines peut être exprimée :

— par le poids sec,
— par la longueur totale de toutes les racines,
— par leur surface totale (très difficile à mesurer) ;

2° *la ramification des racines et leur diamètre* : la capacité d'absorption du système racinaire est aussi en partie déterminée par :

— degré de ramification,
— diamètre des racines ;

3° *la distribution verticale des racines dans le profil* : elle donne le développement des racines dans chaque horizon et fournit en conséquence des indications sur le prélèvement d'eau et d'éléments nutritifs dans ces horizons (important pour la résistance à la sécheresse) ;

4° *la distribution latérale des racines dans le profil.*
Elle est importante aussi bien pour le binage mécanique que pour les densités d'implantation ;

5° *la profondeur et la largeur maxima d'enracinement* ;

6° *la vitesse et les périodes de croissance des racines.*

***

Les études précédentes peuvent porter sur :

A : des expériences en plein champ. ;
B : des expériences en vase de végétation.

A — *Expériences en plein champ*

1° *Méthode de la « planche à aiguilles » et excavation* : elle révèle :

a) la structure, la forme et la quantité totale de racines,
b) la répartition et la profondeur maxima d'enracinement,
c) la vitesse de croissance,
d) la ramification des racines.

2° *Étude de petits échantillons de sol* (Méthode d'AUGER).

Elle fournit :

a) des données sur la quantité de racines présentes dans chaque couche,
b) la distribution verticale et la profondeur maximum d'enracinement,
c) le développement latéral du système radiculaire (en prélevant des échantillons à des distances de la plante variables,
d) la vitesse de développement (par des échantillonnages périodiques.)

3° *Méthode du profil de* WALLS.

On établit un schéma du système racinaire puis l'on compte les racines. Cette méthode est très adaptée à :

— l'étude de la distribution et de la profondeur maximum des racines,
— l'étude de la quantité totale des racines (dans un milieu donné).

Elle est moins recommandée pour :

— l'étude des ramifications,
— l'étude de la vitesse de croissance.

B — *Expériences en vase de végétation*

Le problème est plus simple car l'on peut utiliser :

1° des cylindres ;
2° des contenants à panneaux vitrés remplis de sol,
3° des cultures sur solutions dans des récipients de verre,
4° des combinaisons des solutions précédentes.

L'ouvrage fournit sous une forme concise des explications approfondies sur les divers points mentionnés. Il contient de nombreuses illustrations, schémas et tableaux qui facilitent la compréhension des différentes méthodes. De plus, il rassemble une importante bibliographie (158 références) et présente ainsi un grand intérêt pour tous ceux qui s'occupent de la morphologie du système racinaire.

I. M. N.

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abrévations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction*, dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour la collaboration, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc). l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de : et *al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses, de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World-List of Scientific Periodicals, sur le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine); le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0.25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il esr recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5, × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. CHAMINADE, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise), France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur-Gérant: M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1966.

Dépôt légal: 2e trimestre 1966. N° d'impression: 526.

ANNALES
AGRONOMIQUES

VOLUME 16 1965 NUMÉRO 6

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE
149, rue de Grenelle - PARIS-7e

Reproduction, même partielle, interdite sans autorisation des auteurs et de l'Institut national de la Recherche agronomique, à l'exception des sommaires et résumés.

Ann. agron., 1965, **16** (6), 603-623.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'INFLUENCE DU PH SUR LA MOBILITÉ DES IONS PHOSPHORIQUES DU SOL

G. BARBIER, J. BILAUS (1) et Raymonde BONIFACE

Centre national de Recherches agronomiques,
Station centrale d'Agronomie, Versailles (Yvelines)

SOMMAIRE

Le but essentiel de cette étude est d'essayer de montrer qu'une franche alcalinisation d'un sol par la chaux — aussi bien qu'une acidification prolongée — peut diminuer la concentration en ions PO_4''' du sol, tout en augmentant la quantité de PO_4''' isotopiquement diluable en un temps limité.

INTRODUCTION — BUT DE L'ÉTUDE

Un travail déjà ancien de l'un de nous (1) suggère que des ions phosphoriques peuvent être libérés des particules minérales du sol par chaulage, même au-delà de la neutralité. Et pourtant, le chaulage au-dessus de pH 7,0 environ est considéré comme favorisant la fixation des ions PO_4''' dans le sol (2). Ce désaccord sur les conséquences du chaulage peut être apparent ou réel selon le sens que l'on attribue aux termes de libération et de fixation.

La nature des liaisons qui retiennent les ions PO_4''' dans le sol a été récemment précisée grâce à l'emploi de l'isotope ^{32}P. Celui-ci a permis d'obtenir la preuve matérielle que des ions PO_4''' adsorbés dans le sol humide demeurent animés de mouvements de diffusion. De sorte que chacun passe en moyenne une petite partie de son temps dans la solution libre, une partie beaucoup plus importante à proximité immédiate des sites adsorbants superficiels des particules minérales, et une partie souvent encore plus importante à l'intérieur des particules solides, dans les micropores accessibles au cheminement de ces ions. Du moins est-ce là une interprétation vraisem-

(1) Ingénieur agronome roumain, assistant à la Station agronomique de Cluj.

blable de la cinétique de l'échange isotopique des ions PO_4''', laquelle comporte en général une branche rapidement ascendante (échanges rapides entre solution et surfaces solides externes) suivie d'une branche lentement ascendante (échanges entre l'extérieur et l'intérieur des particules), dont l'asymptote est d'ailleurs difficile à déterminer.

Il est donc concevable que certains traitements du sol puissent modifier à la fois la distribution des ions PO_4''' diffusibles entre différentes portions de l'espace du sol, et la quantité des ions PO_4''' distribuables.

En particulier, il est concevable qu'un chaulage puisse renforcer l'adsorption des ions PO_4''' diffusibles par les surfaces solides, diminuant ainsi la concentration en PO_4''' de la solution, tout en augmentant les ions PO_4''' qui sont l'objet de cette adsorption, ou tout en accélérant les échanges entre l'extérieur et l'intérieur des particules. C'est l'étude de ces derniers points, susceptibles de résoudre le désaccord signalé au début, qui fut initialement le but essentiel de la présente recherche.

La question ne paraît pas dénuée d'intérêt pratique. S'il est établi que le chaulage au-dessus de pH 7,0 environ diminue en général la concentration en PO_4''' de la solution, ceci peut être la conséquence soit de la formation des phosphates calciques individualisés, soit du renforcement de l'adsorption d'ions PO_4''' demeurant diffusibles. Dans le premier cas, une fraction des ions PO_4''' précipités pourrait devenir irréversiblement fixée, sous forme définitivement inassimilable, par un processus connu que nous rappelerons brièvement, ce qui nous donnera l'occasion de préciser ce que nous entendons par fixation irréversible.

Dans un sol où les fumures phosphatées augmentent peu à peu ou brusquement la quantité d'ions PO_4''' diffusibles, et en conséquence la concentration en PO_4''' de la solution en équilibre, il est hautement probable que si l'activité PO_4''' dépasse un certain niveau, un phosphate cristallisé se forme, (ou plusieurs, l'activité des divers ions susceptibles de former des phosphates n'étant jamais uniforme ni constante dans le sol en place). Les ions PO_4''' constitutifs de ces cristaux y sont actuellement fixés. Mais si ces phosphates sont capables de se redissoudre en totalité par retour au niveau initial d'activité PO_4''', il ne s'agirait évidemment pas là d'une fixation irréversible. Les ions PO_4''' précipités pourraient d'ailleurs, dans cette hypothèse, alimenter les plantes au même titre que les ions PO_4''' adsorbés.

En fait, les choses ne se passent pas ainsi, au moins pour certains phosphates dans certains intervalles de pH. Lorsqu'un phosphate calcique a précipité d'une solution initialement stable, par élévation de sa concentration en PO_4''' au-dessus d'un certain niveau, l'activité des ions Ca^{++} et OH^- demeurant constante, si l'on cherche ensuite à redissoudre ce phosphate au moyen de la solution phosphatée initiale, par percolation continue ou par renouvellements successifs du solvant, on constate que la concentration en PO_4''' peut retomber à sa valeur initiale bien avant que la totalité de PO_4''' précipité ne soit repassée en solution. En milieu basique, une fraction de PO_4''' précipité peut ainsi devenir rigoureusement insoluble dans la solution phosphatée calcique initiale. Cette fraction est d'autant plus importante que le rapport Ca/P est plus grand dans le phosphate calcique initialement formé et que le pH du solvant est plus élevé. La fraction insolubilisée peut dépasser 90 p. 100 pour un phosphate tricalcique initialement sans apatite, à pH 8,2 (3 — Schœn et *al.*, 1954). Le phosphate calcique formé au début, bicalcique par exemple, cède à la solution relativement plus de PO_4''' que de Ca et se transforme ainsi en un phos-

phate plus basique et moins soluble que le phosphate initial. C'est là le type d'une fixation irréversible, comportant une perte d'activité de l'ion considéré au cours d'un cycle fermé de transformations.

Il est vraisemblable que dans les sols calcaires ou saturés de Ca, après incorporation de phosphates solubles, surtout si ceux-ci sont appliqués sous forme de gros granules ou par bandes étroites, des phosphates calciques précipitent, qui peuvent évoluer ensuite vers le type apatitique, et dont la quantité augmenterait après chaque application d'engrais. Quelques travaux suggèrent que pour entretenir dans les sols calcaires l'activité des ions PO_4''' à un niveau élevé, compatible avec la nutrition optimale des cultures, il est nécessaire d'y incorporer indéfiniment plus d'ions phosphoriques que les récoltes n'en exportent (4,5), ce qui ne paraît pas être le cas dans les sols neutres ou légèrement acides.

Quant aux nombreux phosphates complexes de Ca, Fe, Al, etc.. susceptibles de se former dans divers sols après incorporation d'engrais phosphatés solubles, il est possible que leur décomposition ultérieure laisse un résidu phosphaté stable. L'étude de ce point, qui avait été abordée au Congrés de Madison (6 — LINDSAY et TAYLOR, 1960) ne semble pas avoir sensiblement progressé à celui de Bucarest.

TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

a) *Essais de laboratoire sur l'influence du pH*

Une même terre, originaire d'un sous-sol pauvre en matière organique et en phosphore, exempte de calcaire, mais neutre, d'un type dominant dans la région parisienne, a été utilisée pour toutes nos expériences de laboratoire. Voici la composition de cette terre :

Argile 2 μ (montmorillonite et illite surtout)	27,2 p. 100
Limon 2 μ-20 μ	18,4 —
Sable très fin 20 μ-50 μ	49,0 —
Sable fin	4,0 —
Sable grossier	0,6 —
CO_3Ca	0,0 —
pH (eau)	7,2 —
pH (KCl 0,1 N)	6,3 —
Capacité d'échange	18,8 méq/100 g
Ca échangeable	16,4 —
K échangeable (acétate d'NH_4)	0,3 —
Mg échangeable	1,1 —
Carbone organique	3,4 p. 1 000
Azote total	0,44 —
P_2O_5 sol. ac. citrique 2 p. 100	0,072 —
Oxyde de fer libre (en Fe)	14,6 —

Plusieurs échantillons de terre séchés à l'air ont été d'abord uniformément traités avec une solution d'acide chlorhydrique dilué et de phosphate monocalcique, pendant un temps variable d'une série d'essais à l'autre, en général prolongé (7 à 30 jours) de façon à provoquer une adsorption importante d'ions PO_4''' par la terre en milieu acide. Les quantités de réactifs seront indiquées pour chaque expérience. Puis on a ajouté une solution aqueuse de $Ca(OH)_2$ en quantité variable, pour remonter le pH, jusqu'à 8,5. En raison de la lenteur d'établissement de l'équilibre comme l'indique la figure 1, on a ajouté à plusieurs reprises (sauf dans l'expérience n° 5) de nouvelles quantités de chaux, l'électrode de verre du pH-mètre plongeant dans la suspension agitée. Après un temps de contact et d'agitation périodique qui selon les expériences a varié de 36 h à 3 semaines, on a ajouté une solution $^{32}PO_4'''$ (pratiquement sans entraîneur, voir techniques analytiques). Après un temps

d'agitation relativement court (en général 24 ou 48 h), on a dosé chimiquement PO_4''' en solution, et compté la radioactivié de ^{32}P en solution, selon les techniques décrites ci-dessous, ce qui permettait de calculer PO_4''' isotopiquement dilué.

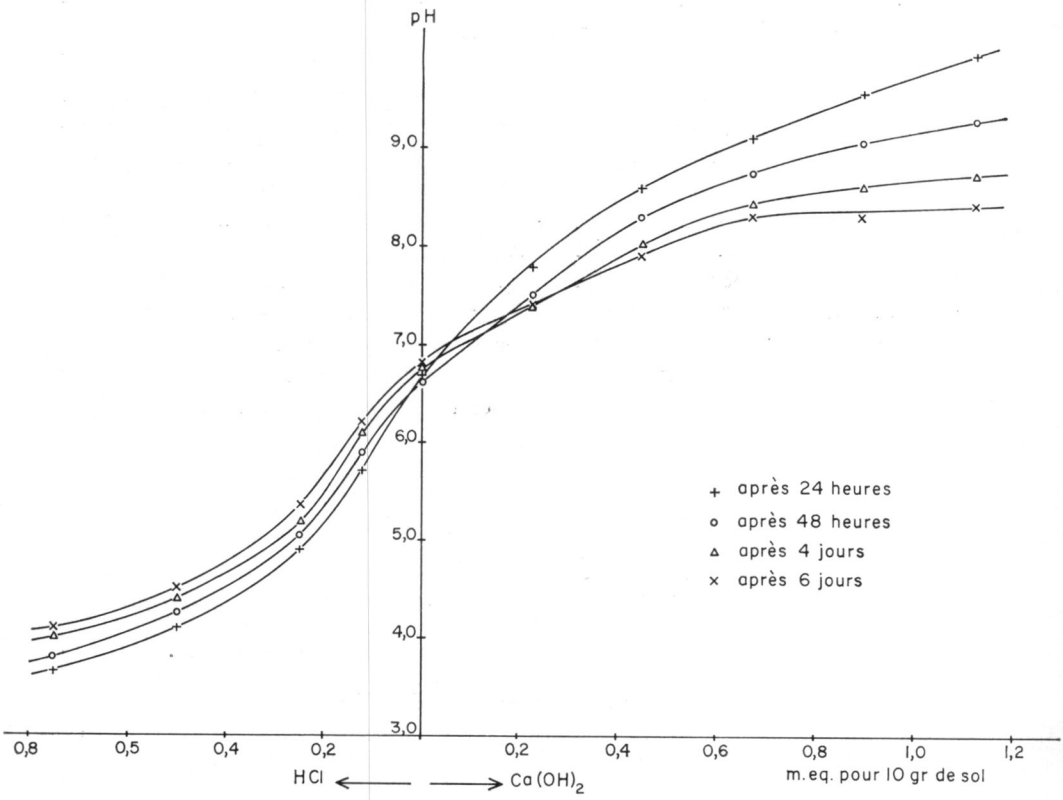


FIG. 1. — *Courbes de titration de la terre utilisée en fonction du temps*
(pH eau, rapport sol/eau = 1/2,5)

Ces différentes opérations n'ont pu être conduites à une température rigoureusement constante, se maintenant cependant entre 18 et 22 °C.

b) *Influence du pH dans un sol en place*

C'est le champ d'expériences dit des 42 parcelles du Domaine du Centre national de Recherches agronomiques, Versailles, qui a été utilisé pour cette étude. Les parcelles de ce champ reçoivent chacune un engrais simple, chaque année, depuis 1929.

	kg par ha et par an
Engrais ammoniacaux et nitriques	150 kg N
Superphosphate à 14 p. 100 puis à 16 p. 100 P_2O_5	1 000 kg d'engrais
Scories à 18 p. 100 P_2O_5	1 000 kg d'engrais
Phosphate naturel moulu 28 à 30 p. 100 P_2O_5	1 000 kg d'engrais
Engrais potassiques	250 kg K_2O
Calcaires ou chaux	1 000 kg CaO

Ce champ est maintenu sans végétation, mais reçoit chaque année deux labours et des façons superficielles pour détruire les mauvaises herbes. On a déterminé pour chacune de ces parcelles le pH et PO_4''' isotopiquement diluable dans l'eau en 24 h.

On a également comparé, dans des essais de laboratoire, l'adsorption de PO_4''' par les terres de différentes parcelles ne recevant pas d'engrais phosphatés. Enfin, on a dosé différentes fractions du phosphore minéral selon CHANG et JACKSON (7) dans les parcelles recevant des phosphates solubles.

TECHNIQUES ANALYTIQUES

a) *Dilution isotopique*

Le principe de la dilution isotopique des ions de même espèce retenus à l'état diffusible dans une suspension ou une dispersion colloïdale, est simple et connu. Mais son application à l'ion phosphorique du sol présente certaines difficultés, notamment la possibilité d'un grave défaut de précision dans le dosage chimique de PO_4''' en solution, et les adsorptions indésirables des ions phosphoriques en solution très diluée, notamment des ions $^{32}PO_4'''$ sans entraîneur.

Toute erreur sur le dosage chimique de PO_4''' en solution se répercute par une même erreur relative sur la quantité calculée de PO_4''' isotopiquement dilué. Or, on sait quelles difficultés présente le dosage de PO_4''' minéral dans un extrait aqueux de sol aux faibles concentrations de cet ion, ce qui est souvent le cas dans les sols cultivés même non déficients, surtout s'ils sont calcaires ou saturés de Ca.

Nous avons essayé d'augmenter la concentration de PO_4''' dans la solution en équilibre en lui ajoutant CO_3HNa, jusqu'à une concentration de 0,4 M comme l'un de nous l'avait déjà suggéré (5). Il va de soi que cette addition n'est correcte que si elle a seulement pour effet d'extraire du solide une fraction plus importante du mélange d'isotopes sans modifier la composition de celui-ci. Or, nous avons constaté que la radioactivité spécifique de PO_4''' en solution peut diminuer rapidement au contact de CO_3HNa (par libération d'une quantité supplémentaire de $^{31}PO_4'''$) (fig. 2, qui concerne une terre enrichie en PO_4''' depuis plusieurs mois).

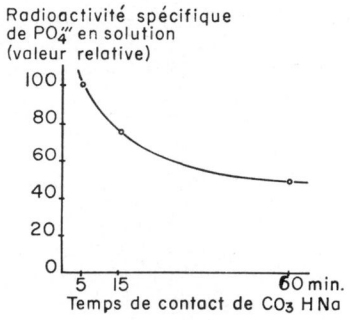


FIG. 2. — *Action du bicarbonate de sodium sur la radioactivité spécifique de PO_4''' en solution. Sol enrichi en PO_4 depuis plusieurs mois.* CO_3HNa a été ajouté 24 h après l'addition de $^{32}PO_4$.

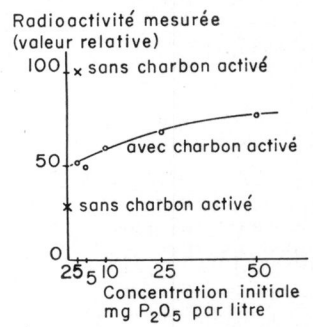


FIG. 3. — *Adsorption de $^{32}PO_4'''$ en mélange homogène avec une quantité croissante de $^{31}PO_4'''$ par l'ensemble des instruments utilisés (avec ou sans charbon activé).*

Il faudrait donc faire agir CO_3HNa pendant un intervalle de temps aussi court que possible, mais rigoureusement contrôlé. Nous avons renoncé à son emploi.

C'est la méthode de réduction par $SnCl_2$ que nous avons adoptée, qui nous a paru plus sensible que la méthode à l'acide ascorbique.

Par ailleurs, rappelons qu'il est indispensable d'ajouter à chacune des dilutions successives de la solution $^{32}PO_4'''$, fournie sans entraîneur, une petite quantité de $^{31}PO_4'''$ entraîneur (au minimum 1 mg P_2O_5 par litre) pour supprimer les adsorptions parasites. La figure 3 confirme que l'adsorption de PO_4''' par l'ensemble des instruments utilisés (pipette et flacon jaugé en verre, tube à centri-

fuger en polyéthylène dans le cas de l'addition de charbon, fiole à agitation en polyéthylène) est proportionnellement d'autant plus forte que la concentration en PO_4''' est plus petite. D'après cette figure, l'adsorption de $^{32}PO'''$ sans entraîneur (abscisse o) par les instruments a atteint environ 70 p. 100.

C'est pour cette raison qu'il convient de rincer plusieurs fois la pipette avec la solution utilisée. D'autre part, la solution $^{32}PO_4'''$ (avec un peu d'entraîneur) doit être ajoutée à la suspension de terre avec le plus grand soin, en agitant constamment, pour éviter une répartition non uniforme de $^{32}PO_4'''$ comme conséquence d'une adsorption éventuellement irréversible ou lentement réversible par les premières particules de terre contactées.

Voici succinctement notre mode opératoire :

A une suspension de 10 g de terre dans 200 ml d'eau (éventuellement d'une solution $CaCl_2$ 0,015 N, pour éviter une dispersion du solide, laquelle pourrait accélérer la diffusion à l'intérieur des particules), on a ajouté environ 500 000 coups/minute de $^{32}PO_4'''$ sous un volume de 5 ml. Après un certain temps, on a séparé le liquide par centrifugation ; on y a dosé P_2O_5 et compté ^{32}P, soit par compteur à liquide, soit par compteur-cloche après précipitation sous forme de phosphomolybdate en présence d'une quantité constante d'entraîneur. La formule générale de dilution isotopique est :

$$\frac{PO_4''' \text{ isotopiquement dilué}}{^{32}PO_4''' \text{ introduit}} = \frac{PO_4''' \text{ en solution}}{^{32}PO_4''' \text{ en solution}}$$

PO_4''' isotopiquement dilué désigne l'ensemble de PO_4''' diffusible préexistant et de PO_4''' ajouté en solution (comme entraîneur). Dans le cas du compteur à liquide, cette formule peut s'écrire comme suit, en supposant qu'une même fraction aliquote de la solution ^{32}P a été utilisée pour les essais et pour le comptage standard :

$$\frac{M}{Vc} = \frac{N_0 V_0}{NV}.$$

M : masse totale de PO_4''' isotopiquement dilué dans l'essai
c : concentration en PO_4''' de la solution
V : volume de la solution dans les essais
N_0 : nombre de coups/minute, comptés dans la solution standard, la prise d'essai ayant été amenée à un volume V_0.
N : nombre de coups/minute comptés dans la solution de l'essai (supposée sans dilution avant comptage).

La formule suppose que le nombre de coups/minute enregistré est proportionnel à la concentration en radioélément (si ce n'était pas le cas, une correction serait nécessaire). Le premier membre de cette relation est l'inverse de la fraction en solution de PO_4 isotopiquement dilué, le deuxième membre est l'inverse de la fraction en solution de $^{32}PO_4'''$. En l'espèce, la formule se réduit finalement à :

$$M = \frac{N_0 V_0 c}{N}$$

Il va de soi qu'il faut retrancher de M ainsi calculé la petite quantité de PO_4''' ajoutée comme entraîneur (généralement négligeable).

Nous avons vérifié qu'entre les répétitions d'un même essai, on constate souvent des différences notables de concentration en PO_4''', mais en même temps des différences de même sens et de même ordre de la radioactivité en solution, ce qui fait que la quantité de PO_4''' isotopiquement diluée conserve sensiblement la même valeur.

b) *Colorimétrie de* PO_4''' *en solution*

Rappelons que pour obtenir un dosage correct par la méthode molybdique, avec le chlorure stanneux comme réducteur, il faut observer un intervalle de temps rigoureusement constant entre le mélange du réducteur et la lecture, comme d'ailleurs entre le mélange du réactif sulfomolybdique et l'introduction du réducteur, pour tous les essais et les étalons d'une même série.

Il va de soi que le moindre trouble de la solution colorée, fréquent en présence de matière organique, peut conduire à des erreurs graves dans la colorimétrie par cellule photoélectrique, sans que l'analyste en soit nécessairement averti. Nous avons essayé l'emploi du charbon activé, ajouté dans la suspension de terre. Une adsorption par le charbon du mélange d'isotopes ne modifierait que la concentration en PO_4''' mais non la dilution isotopique. Mais il nous a été difficile d'obtenir un charbon pratiquement exempt de PO_4''' diffusible. Nous avons renoncé en l'espèce à son emploi.

Les réactifs sont ceux indiqués par JACKSON (8).

RÉSULTATS

A — *Expériences de laboratoire*

Expérience nº 1 : Adsorption des ions PO_4''' en fonction du pH et du temps (fig. 4).

Cette expérience, qui n'a pas comporté de dilution isotopique, avait surtout pour but de fixer les conditions expérimentales à respecter pour éviter la précipitation de phosphates calciques, tout en faisant adsorber à la terre une quantité im-

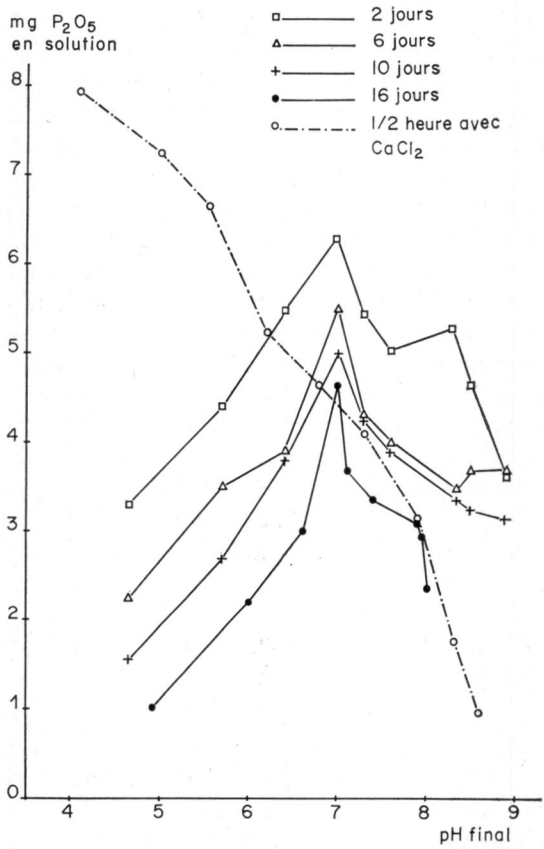


FIG. 4. — *Adsorption de PO_4''' par la terre étudiée en fonction du pH et du temps.* Concentration initiale de la solution : 25 mg P_2O_5/l. Le diagramme en traits discontinus correspond à une concentration uniforme en $CaCl_2$ = 0,014 N.

portante d'ions PO_4'''. Voici le schéma de cette expérience : 10 g de terre à l'état naturel ; volume final : 200 ml, dont 125 ml d'une solution de phosphate monocalcique contenant 5 mg P_2O_5 + HCl ou Ca $(OH)_2$ pour faire varier le pH. Le diagramme en traits discontinus de la fig. 4 a été obtenu en présence de $CaCl_2$ 0,014 N, les autres diagrammes sans $CaCl_2$ ajouté.

D'après un travail antérieur de l'un de nous (9), le seuil de précipitation d'un phosphate calcique, pour une concentration en $CaCl_2$ 0,015 N, a, en fonction du pH, les valeurs approximatives suivantes, à 15°C :

pH	mg P_2O_5 par litre
6,5	> 50
7,0	50 environ
7,5	7 —
8,0	3,5 —
8,5	2,5 —

D'après ces chiffres et d'après la fig. 4 (diagramme en traits discontinus), il est possible qu'à pH élevé, une fraction des ions phosphoriques ajoutés ait précipité sous forme d'un phosphate calcique, celui-ci pouvant se redissoudre au moins partiellement au fur et à mesure que l'adsorption progresse. La meilleure technique expérimentale en vue du but poursuivi serait d'ajouter la solution de phosphates par fractions successives, séparées par des agitations prolongées, pour éviter une trop forte élévation de la concentration en PO_4'''. Nous ne l'avons pas fait dans les expériences décrites ci-après, pour éviter de compliquer les manipulations.

La fig. 4 confirme que l'adsorption augmente au cours du temps, la limite ne paraissant pas atteinte après 16 jours d'agitations périodiques. Cette figure montre également que l'adsorption passe par un minimum très accusé au voisinage de la neutralité, mais seulement après un certain temps de contact. Ce fait peut être attribué à une activation progressive d'ions Fe ou Al en milieu acide. En effet, après une demi-heure d'agitation seulement, l'adsorption de PO_4''' par cette terre naturellement neutre diminue régulièrement avec l'abaissement du pH.

Enfin, il est confirmé qu'une élévation de la concentration en sels de calcium favorise l'adsorption de PO_4''' (peut-être par contraction de la couche de Gouy, ce qui aurait pour effet d'intensifier les interactions entre Ca^{++} et PO_4''' adsorbés à l'état diffusible).

Expérience n° 2 : Influence de la recalcification sur PO_4''' isotopiquement diluable, après un court temps de contact de PO_4''' en milieu acide.

La terre a été d'abord lessivée par $CaCl_2$ normal (20 fois la capacité d'échange du sol), pour remplacer tous les cations échangeables par Ca. Après lavages à l'eau, on l'a remise en suspension dans une solution HCl, contenant par kg de terre 17 méq. HCl, soit environ le 1/10 de sa capacité d'échange. Elle a été ensuite lavée à l'eau, puis séchée à l'air. Son pH dans l'eau était alors 5,5. C'est cette terre légèrement acidifiée qui a servi à l'expérience dont voici le schéma : 2 g de terre partiellement décalcifiée ; volume final : 400 ml, dont 200 ml $CaCl_2$ 0,03 N, et 100 ml contenant 1 mg P_2O_5 du phosphate monocalcique ; 48 h de contact ; puis volume variable de solution Ca $(OH)_2$. Après 15 jours de contact (avec agitations), addition de $^{32}PO_4'''$, et mesure de la radioactivité spécifique de PO_4''' en solution après 24 h.

Les résultats sont reportés sur la fig. 5 ; on y voit qu'au dessus de pH 7,3 environ, PO_4''' isotopiquement diluable augmente par élévation du pH relativement plus que PO_4''' en solution.

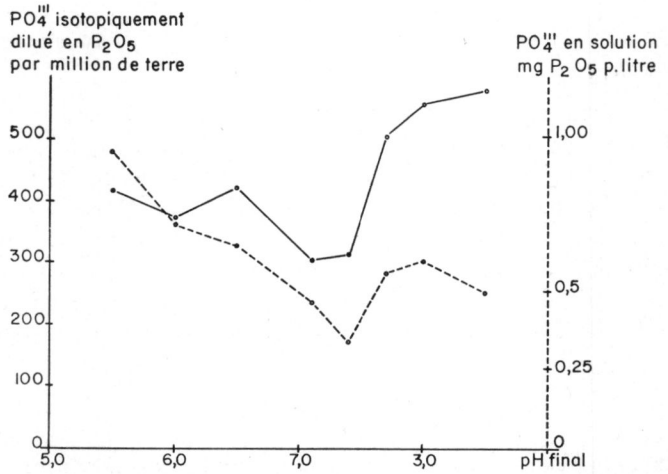


FIG. 5. — *Influence de la recalcification à niveau variable sur PO_4''' isotopiquement diluabl·, après un court séjour de PO_4''' en milieu uniformément acide.*

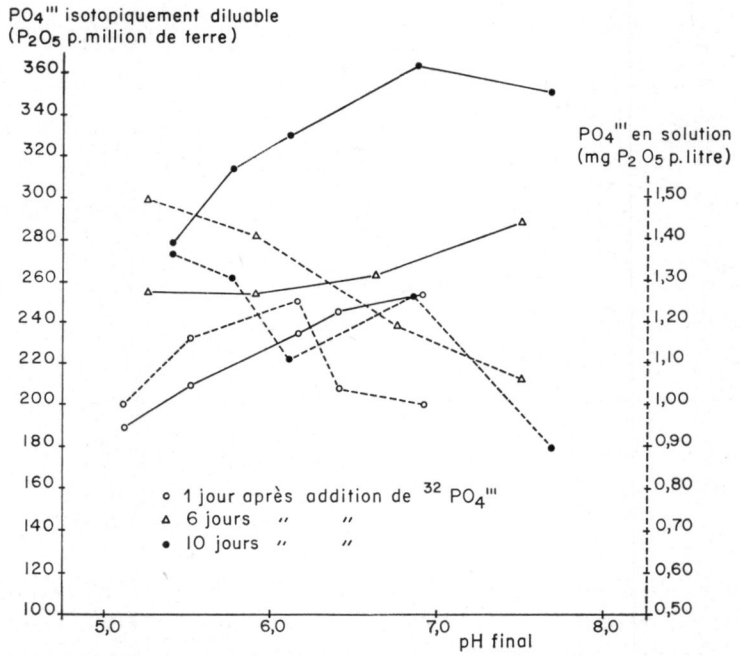


FIG. 6. — *Influence de la recalcification à niveau variable sur PO_4''' isotopiquement diluable, après un séjour prolongé en milieu uniformément acide.*

Dans les expériences suivantes, le temps de contact entre la terre et la solution phosphatée en milieu acide a été prolongé (de 12 à 30 jours).

Expérience n° 3 : Influence de la recalcification sur PO_4''' isotopiquement diluable en un temps variable, après acidification prolongée.

Voici le schéma de cette expérience : 10 g de terre à l'état naturel ; volume final 200 ml, dont 175 ml d'une solution contenant 5 mg P_2O_5 du phosphate monocalcique, 0,3 méq. HCl, et $CaCl_2$ avec concentration uniforme en Cl^-, 0,015 N ; contact 30 jours (avec agitations) ; puis addition de solution $Ca(OH)_2$ à doses croissantes ; contact 15 jours avec agitation, puis deux réajustements du pH par addition de chaux, pendant 15 jours. Enfin addition de $^{32}PO_4'''$; mesure de la radioactivité spécifique de PO_4''' en solution après 6 et 10 jours ; la dernière dilution isotopique a été précédée de deux nouveaux ajustements du pH par addition de chaux (fig. 6 et tabl. 1).

TABLEAU I

Expérience n° 3 : Influence de la recalcification du sol sur PO_4''' diffusible (isotopiquement diluable)

1° — 1 jour après l'addition de $^{32}PO_4'''$					
pH	5,10	5,50	6,15	6,40	6,90
mg P_2O_5 par litre	1,00	1,16	1,25	1,28	1,00
P_2O_5 isotopiquement dilué p. million de terre	187	209	234	245	263
2° — 6 jours après l'addition de $^{32}PO_4'''$					
pH		5,25	5,90	6,75	7,50
mg P_2O_5 par litre		1,49	1,42	1,18	1,06
P_2O_5 isotopiquement dilué		256	254	263	288
3° — 10 jours après l'addition de $^{32}PO_4'''$, avec deux nouvelles additions de chaux					
pH	5,40	5,76	6,11	6,83	7,67
mg P_2O_5 par litre	1,37	1,31	1,12	1,26	0,90
P_2O_5 isotopiquement dilué	277	314	330	363	349

D'après l'allure générale des diagrammes de la figure 6, PO_4''' isotopiquement diluable en un temps donné augmente avec le degré de resaturation du sol en chaux, alors que la concentration en PO_4''' diminue (surtout dans la zone neutre et alcaline).

A noter que PO_4''' isotopiquement dilué a augmenté lentement avec le temps, tout en restant inférieur à la quantité introduite (500 P_2O_5 par million) après 10 jours d'agitations périodiques des suspensions, ce qui est habituel pour un sol de ce type. La 3e mesure, faite après 10 jours de contact de $^{32}PO_4'''$ et deux nouvelles

additions de chaux, indique une légère diminution de PO_4''' isotopiquement diluable par élévation du pH final de 6,8 à 7,6 environ. Il est possible que l'addition de chaux ait provoqué une précipitation de phosphate calcique avec blocage partiel d'ions $^{32}PO_4'''$ alors que la radioactivité spécifique de PO_4''' diffusible était encore relativement élevée et voisine de celle correspondant au deuxième diagramme. D'ailleurs la concentration de PO_4''' en solution a relativement beaucoup plus diminué que PO_4''' isotopiquement diluable.

Expérience nº 4 : mêmes conditions que dans l'expérience nº 3, mais l'addition de $^{32}PO_4'''$ n'a eu lieu que 7 jours après l'addition de $Ca(OH)_2$, et la mesure de la dilution isotopique 3 heures après l'addition de $^{32}PO_4'''$.

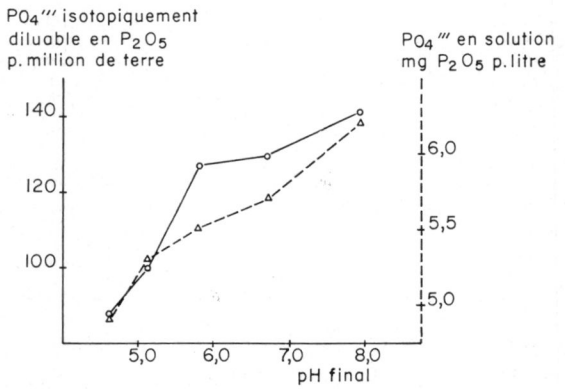


FIG. 7 — *Influence d'une recalcification récente à niveau variable sur PO_4''' isotopiquement diluable.*

D'après la fig. 7, la recalcification a augmenté à la fois PO_4''' isotopiquement diluable et PO_4''' en solution, même jusqu'à 8,0 environ.

Expérience nº 5, comportant une introduction prématurée de $^{32}PO_4'''$, sans entraîneur, avec des conséquences apparemment absurdes.

Cette expérience a été conduite d'abord de la même façon que l'expérience nº 3 le temps de contact de $^{32}PO_4'''$ avec la terre en milieu acide ayant été de 14 jours. La solution de $^{32}PO_4$ a été ajoutée sans aucun entraîneur, par une erreur de manipulation ; d'autre part, cette solution a été ajoutée peu de temps après l'addition de chaux (36 heures après) alors que le pH, encore loin de son équilibre (fig. 1) était nettement basique pour les plus fortes additions de chaux (tabl. 2).

D'après le tableau 2, PO_4''' calculé comme isotopiquement dilué a diminué fortement entre la première mesure (24 h) et la seconde (6 jours), c'est-à-dire que la radioactivité spécifique de PO_4''' en solution a augmenté de la première à la seconde. Ceci ne peut guère s'expliquer que par un blocage temporaire, sous forme non diffusible ou très lentement diffusible, d'une partie des ions $^{32}PO_4'''$ ajoutés et non pas par l'intervention de quelque démon de Maxwell, capable de trier des molécules identiques d'origine différente après leur mélange. Rappelons que la formule de dilution isotopique suppose que la totalité des $^{32}PO_4'''$ ajoutés demeure diffusible.

A noter que le blocage éventuel d'ions $^{32}PO_4'''$ se serait produit non seulement en milieu calcique basique, mais aussi en milieu acide.

On voit par là avec quelle précision doivent être définies les conditions expérimentales dans ce genre de recherches, pour que l'on puisse discerner les divers processus possibles d'évolution des ions phosphoriques.

TABLEAU 2

Dilution isotopique de PO_4''', en cas d'introduction prématurée de $^{32}PO_4$ sans entraîneur (1)

PO_4''' isotopiquement dilué, en P_2O_5 par million de terre
(P_2O_5 ajouté : 500 par million)

pH	4,9	5,6	6,25	6,5	7,0	7,4
Temps de contact de $^{32}PO_4'''$:						
1 jour	368	328	320	372	285	258
6 jours	233	181	197	203	212	161
10 jours	178	230	226	224	230	213

(1) Les résultats indiqués ont été interpolés sur les diagrammes correspondant aux trois mesures successives ; ils s'écartent d'ailleurs peu des résultats expérimentaux.

B — *Influence du pH sur la mobilité de PO_4''' d'un sol en place*

Les échantillons de sol étudiés dans ce chapitre proviennent des parcelles dont l'historique a été décrite plus haut dans le chapitre Techniques.

TABLEAU 3

PO_4''' isotopiquement diluable en 24 h dans les diverses parcelles d'un champ d'expériences permanent. Échantillons de 1965

Versailles (1929-1965)

Nature des engrais appliqués	pH du sol (1 de terre pour 2,5 d'eau)	Concentration de la solution γ P_2O_5/200 ml	Fraction de la radioactivité en solution	P_2O_5 isotop. dilué par million de terre
Témoin	6,12	139	0,290	48
SO_4 $(NH_4)_2$	3,42	40,5	0,051	79
Sulfonitrate NH_4	3,66	65,5	0,083	79
$ClNH_4$	3,38	46,0	0,074	62
Sang desséché	3,58	63	0,098	64
Phosphate diammonique	3,80	2 900	0,398	729
Scories Thomas moulues	7,48	1 137	0,535	213
Superphosphate	5,48	1 290	0,580	222
Phosphate naturel	5,72	418	0,390	107
NO_3Na	5,92	185	0,410	45
$(NO_3)_2Ca$	5,00	80,5	0,184	43,5
SO_4K_2	5,02	111	0,220	50,5
ClK	5,43	96,6	0,178	54
Sylvinite	5,40	118	0,325	36,5
CaO	8,14	112	0,215	52
CO_3Ca	8,0	197	0,304	65

1° *Dilution isotopique.*

La dilution isotopique a été effectuée dans les conditions indiquées (voir Techniques : 10 g de terre + 200 cc d'eau contenant $^{32}PO_4$, contact 24 h, dont 6 h d'agitation). Les valeurs de PO_4''' isotopiquement diluable dans le tableau 3 sont la moyenne de deux déterminations différant au maximum de 20 p. 100 pour les parcelles les plus pauvres, et de moins de 15 p. 100 pour les parcelles enrichies par des engrais phosphatés.

Le tableau 3 donne lieu au remarques suivantes :

a) Dans les parcelles qui se sont fortement acidifiées, — celles recevant des sels ammoniacaux ou du sang desséché — et sans engrais phosphaté, PO_4''' isotopiquement diluable a augmenté par rapport au témoin, ou par rapport aux parcelles recevant des nitrates ou des sels de potasse, alors que la concentration en PO_4''' de la solution a diminué. Nous avons là un nouvel exemple où PO_4''' isotopiquement diluable varie en sens inverse de PO_4''' en solution.

b) Dans les mêmes parcelles, la fraction de la radioactivité en solution — égale par définition à la fraction en solution de PO_4''' isotopiquement diluable — est fortement abaissée par rapport aux parcelles non acidifiées. L'acidification a donc considérablement renforcé en l'espèce le pouvoir adsorbant du sol pour PO_4''', comme il sera confirmé plus loin. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle la concentration de PO_4''' en solution diminue malgré l'augmentation de la quantité adsorbée en équilibre.

c) La fraction de PO_4''' appliqué retrouvée sous forme isotopiquement diluable en 24 heures a les valeurs approximatives suivantes :

	kg P_2O_5 appliqués par ha en 35 ans diminués de 10 %	Fraction retrouvée isotopiquement diluable (%)
	—	—
Phosphate diammonique	14 000	16
Scories	5 500	12
Super minéral.....	4 900	14
Phosphate naturel calcique ..	8 800	3,5

Ces valeurs ont été calculées sans soustraire PO_4''' isotopiquement diluable des parcelles-témoin, ce qui conduirait à sous-estimer l'effet d'engrais phosphatés peu solubles, dont la dissolution est limitée par PO_4''' diffusible préexistant. Par ailleurs, on a réduit de 10 p. 100 les quantités de P_2O_5 appliqué, pour tenir compte des pertes par érosion et par prélèvements d'échantillons de terre (la surface des parcelles n'est que de 5 m^2), et l'on a tablé sur un poids de 3 000 tonnes de couche labourée par ha.

Les différences entre phosphate diammonique et superphosphate, ainsi qu'entre superphosphate et scories ne sont assurément pas significatives.

A noter que le phosphate diammonique a fortement réduit Ca échangeable, dans le rapport 3/1 environ, sans laisser une quantité importante de NH_4 échangeable (0,25 méq. p. 100 g parcelle phosphate diammonique, 0,20 méq. p. 100 g parcelle témoin).

La fraction des phosphates très solubles (diammonique et superphosphate) retrouvée sous forme isotopiquement diluable en 24 h. n'est que de 15 p. 100 environ. Il ne faudrait pas en conclure que le reste est véritablement fixé, car la dilution isotopique peut s'étendre considérablement au-delà de 24 heures de contact. Ceci souligne à nouveau la nécessité de poursuivre l'étude cinétique des échanges d'ions PO_4''' pendant un temps aussi prolongé que possible, si l'on veut se renseigner sur l'état réel des ions PO_4''' retenus dans le sol.

Il est d'ailleurs possible qu'en présence des doses massives d'engrais appliquées, l'augmentation de l'activité PO_4''' après un certain nombre d'années, ait limité la dissolution des phosphates les moins solubles (comme déjà indiqué ci-dessus) ou la redissolution des phosphates précipités lors de l'incorporation des phosphates solubles.

D'autre part, nos résultats s'accordent avec une observation antérieure (10), à savoir qu'après un séjour prolongé dans le sol étudié, le phosphore des scories Thomas peut se dissoudre à peu près dans la même mesure que celui des phosphates les plus solubles, même en l'absence de végétation, et celà malgré les doses massives appliquées.

Le phosphate naturel calcique a relativement peu augmenté PO_4''' isotopiquement diluable, ce qui prouve qu'il s'est relativement peu dissous, bien que le sol soit resté acide. Cependant, la concentration en PO_4''' de l'extrait aqueux a été fortement augmentée par rapport au témoin, comme conséquence apparemment d'une dissolution importante des premières doses appliquées, limitant la dissolution des doses appliquées ultérieurement (l'hypothèse d'une forte fixation de PO_4''' au pH observé est invraisemblable d'après l'ensemble du mémoire). Il va de soi qu'en présence des racines des plantes et des microbes qu'elles nourrissent, la dissolution du phosphate naturel dans ce sol pourrait être plus importante.

Les autres engrais n'ont pas eu d'action marquée sur PO_4''' isotopiquement diluable.

2° *Adsorption de PO_4''' au laboratoire.*

Nous avons étudié au laboratoire le pouvoir adsorbant pour PO_4''' des terres de différentes parcelles ne recevant pas d'engrais phosphatés (2,5 g de terre, volume final : 50 ml d'eau contenant 0, 5, 10, 15 ou 20 mg P_2O_5 du phosphate monocalcique par litre, sans autre addition ; agitation 1/2 heure).

La figure 8 confirme un résultat précédent : l'acidification du sol par les sels ammoniacaux a fortement augmenté le pouvoir adsorbant de ce sol pour PO_4'''. Mais il ne faudrait pas en conclure que l'acidification a provoqué une « fixation » d'ions PO_4''', puisqu'au contraire, d'après le paragraphe précédent, elle a augmenté PO_4''' isotopiquement diluable.

Les autres traitements n'ont eu que peu d'effet à cet égard, en excluant le cas des parcelles chaulées, dans lesquelles la rétention de PO_4''' observée peut être pour une forte part la conséquence d'une précipitation de phosphates calciques.

3° *Fractionnement chimique de P minéral.*

Nous avons pensé que le fractionnement de PO_4''' du sol par des méthodes chimiques usuelles (CHANG et JACKSON, 7) pourrait apporter des renseignements complé-

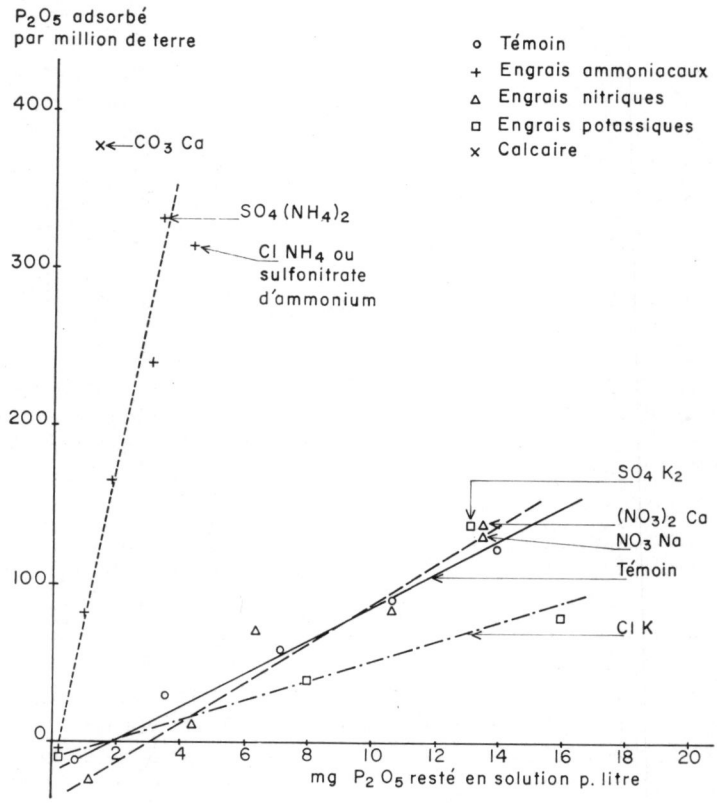


FIG. 8. — *Adsorption de PO_4''' par la terre de différentes parcelles du champ d'expériences de Versailles.*

TABLEAU 4

Fractionnement de PO_4''' selon CHANG *et* JACKSON
champ d'expériences de Versailles (1929-1965)

prélèvement de 1965

Engrais appliqué	Témoin		Chaux		Superphosphate		Scories	
Réactifs d'extraction (1)	P_2O_5 p. million	%	P_2O_5 p. million	%	P_2O_5 p. million	%	P_2O_5 p. million	%
NH_4F 0,5 N (2).....	100	21,8	145,5	27,6	706	53,9	482	46,1
NaOH 0,1 N.....	233	51,2	219	41,5	428,5	32,7	334	31,9
SO_4H_2 0,5 N.....	123	27,0	163	30,9	176	13,4	230	22,0
Total	456	100,0	527,5	100,0	1 310,5	100,0	1 046	100,0

(1) 50 cc de réactif par gramme de sol.
(2) après traitement par NH_4Cl 1,0 N.

mentaires sur l'état de PO_4''' de différentes parcelles de notre champ d'expériences (tabl. 4).

La fraction extraite par NH_4F est dite schématiquement phosphate-Al, celle extraite par NaOH phosphate-Fe, et celle extraite par SO_4H_2 phosphate-Ca.

Cependant, il ne nous semble pas certain que les différentes fractions ainsi séparées correspondent toutes les trois à des formes chimiques individualisées, en raison des faits suivants, publiés autrefois par l'un de nous (1) :

— Un gel de silice calcique neutre n'adsorbe pratiquement pas PO_4'''.

— Différentes argiles naturellement neutres, et tout récemment décalcifiées (acidifiées) n'adsorbent pas non plus PO_4'''.

— Les mêmes argiles à l'état calcique naturel adsorbent largement PO_4'''.

On peut donc penser que l'adsorption de PO_4''' par ces argiles nécessite à la fois la présence d'ions Ca (ou d'autres cations métalliques) mobiles dans les couches diffuses, et la présence de sites attractifs fixes sur les surfaces solides, des Al par exemple. Ainsi, il apparaît que Ca adsorbé peut jouer un rôle important dans la rétention des ions PO_4''' désignés par P-Al.

Par contre, les ions PO_4''' adsorbés grâce à des hydroxydes individualisés (gels mixtes électronégatifs de silice et d'hydroxyde ferrique par exemple), peuvent parfaitement être considérés comme formant des combinaisons chimiques distinctes, même si chacun de ces ions phosphoriques n'y passe qu'une partie de son temps (ce qui est probable, 11).

Quoiqu'il en soit, le tableau 4 confirme de multiples observations antérieures, montrant que la part attribuable aux divers atomes ou ions intervenant dans la rétention de PO_4''' varie largement selon l'action des engrais appliqués sur la réaction du sol.

— Rappelons toutefois qu'une méthode de fractionnement préconisée autrefois par l'un de nous (SO_4H_2 finalement 0,002 N, puis KOH finalement 0,002 N) distinguait les parcelles à scories de celles à superphosphate plus nettement qu'il n'apparaît dans le tableau 4 :

	P_2O_5 par million		Pour cent du total extrait	
Nature des extractions.....	acides	alcalines	acides	alcalines
Parcelle à superphosphate 1943...	206	238	46	54
Parcelle à scories 1943.....	334	80	81	19

Nous reconnaissons d'ailleurs que cette dernière méthode a l'inconvénient de ne pas distinguer PO_4''' des phosphates calciques cristallisés éventuellement présents, de PO_4''' désorbable par acidification de courte durée ; néanmoins, d'après un travail déjà cité (10), il est peu probable que PO_4''' acido-soluble des parcelles à scories s'y trouve pour une part importante sous forme de scories restées non attaquées.

C. — *Évolution d'engrais phosphatés solubles granulés ou pulvérulents, en sols calcaires*

Nous avons rappelé dans l'Introduction la possibilité d'une fixation irréversible de PO_4''' sous forme de phosphates calciques basiques (hydroxyapatite par exemple) en sol calcaire ou saturé de Ca. PO_4''' des engrais pourraît être fixé sous cette forme en proportion d'autant plus grande que la précipitation initiale de phosphates calciques a été elle-même plus abondante. Or, il est raisonnable d'imaginer que la localisation d'un phosphate soluble dans un sol calcique basique sous forme de gros granulés ou par bandes, provoque une précipitation de phosphates calciques plus importante que l'épandage uniforme du même phosphate à l'état pulvérulent. En définitive, s'il est bien établi que la localisation d'un phosphate soluble favorise son action sur une première culture au moins en sol non calcaire , il n'est pas certain que l'action globale sur une série indéfinie de cultures en sol calcaire ne soit pas meilleure dans le cas d'un épandage uniforme, suivi le plus rapidement possible d'un mélange avec la couche arable.

C'est à l'étude de ce dernier point qu'a été destinée l'expérience suivante. Si l'hypothèse émise est exacte, on devrait retrouver sous forme isotopiquement diluable une fraction plus importante du phosphate appliqué à l'état pulvérulent que du même phosphate localisé.

Deux cents g. de divers sols calcaires :

Terre crayeuse de Champagne	84,4	$CaCO_3$ p. 100
Sol brun calcaire	13,6	» »
Alluvions argilo-calcaires	41,7	» »

ont été placés dans une allonge par couches successives, des granules de superphosphate (2 mm) étant déposés sur chacune. D'autres allonges ont été remplies d'un mélange intime du sol avec le même superphosphate pulvérulent, à dose égale.

TABLEAU 5

Effet du vieillissemment d'un superphosphate, granulé ou pulvérulent, en terre calcaire.
Quantité incorporée : 1.000 P_2O_5 p. million de terre.

	PO_4 isotopiquement diluable en P_2O_5 par million			
	Super 16 %		Super 48 %	
	Pulvérulent	Granulé	Pulvérulent	Granulé
Terre de Champagne.....	363	273	374	413
Sol brun calcaire.....	428	444	508	513
Alluvions argilo-calcaires.....	357	337	333	462

On a utilisé deux superphosphates, l'un à 16 p. 100 de P_2O_5, l'autre à 48 p. 100, chacun sous forme granulée ou pulvérulente, à raison de 1 P_2O_5 p. 1000 de terre. La colonne de terre a été imbibée par en dessous avec de l'eau distillée, puis sou-

mise pendant deux mois à trois alternances de dessiccation et d'arrosage jusqu'à saturation. Nous espérions provoquer ainsi des mouvements alternés de descente et de montée de l'eau, susceptibles d'assurer une large diffusion des ions PO_4''' des granules. Le sol a été ensuite extrait des allonges, séché, homogénéisé et l'on y a dosé PO_4''' isotopiquement diluable en 24 h. (tabl. 5).

Les résultats obtenus n'indiquent pas de supériorité systématique de l'un quelconque des deux modes d'application expérimentés. Il est possible que les alternances d'arrosage et de dessiccation n'aient pas suffi pour assurer une large diffusion des ions PO_4''' adsorbés au voisinage des granules de phosphate et qu'en conséquence les phosphates calciques formés au contact ou à l'intérieur des granules aient peu évolué. Étant donné l'importance pratique de cette question, nous pensons qu'il serait utile d'en reprendre l'étude, en accélérant les diffusions, par percolation de larges volumes d'eau ou par perfusion.

CONCLUSIONS

1° Nos recherches ont confirmé que les changements de réaction d'un sol, en même temps qu'ils modifient la distribution des ions PO_4''' diffusibles entre adsorbants et solution, peuvent également modifier la quantité des ions PO_4''' distribuables.

D'une part, le chaulage d'un sol acide jusqu'à saturation, élevant le pH jusqu'à 8 environ, au moins temporairement, a diminué la concentration de PO_4''' en solution, mais a en général augmenté PO_4''' isotopiquement diluable en un temps limité, sans le diminuer en aucun cas. Ainsi l'abaissement de concentration constaté dans la solution ne peut pas être attribué à un blocage d'ions PO_4''' dans des combinaisons solides cohérentes, phosphates calciques cristallisés notamment.

D'autre part, l'acidification d'un sol en place naturellement neutre, par application de sels ammoniacaux pendant 35 ans, a aussi augmenté la quantité de PO_4''' isotopiquement diluable en un temps limité, mais a diminué la concentration en PO_4''' de la solution, en relation avec une forte augmentation du pouvoir adsorbant du sol à l'égard de PO_4'''. Ici non plus, l'abaissement de la concentration de PO_4''' n'est pas la conséquence d'une fixation réelle d'ions PO_4''' puisque la quantité de ces ions demeurant animés de mouvements de diffusion a été augmentée.

2° Nos recherches ont également confirmé que les processus d'adsorption et de désorption des ions PO_4''' dans le sol peuvent progresser lentement pendant longtemps, vraisemblablement par extension des diffusions et échanges d'ions à l'intérieur de particules solides. En particulier, l'action mobilisatrice du chaulage à l'égard des ions PO_4''' n'est devenue importante dans nos expériences qu'après un temps prolongé d'agitation au laboratoire (1 mois), ce qui tend à prouver que cette action a porté essentiellement sur des ions PO_4''' retenus à l'intérieur de particules solides.

3° D'après nos recherches, le chaulage du sol au-delà de la neutralité peut agir très différemment sur PO_4''' antérieurement adsorbé dans le sol, et sur les engrais

phosphatés qui lui seront ensuite incorporés. En effet, il apparaît comme très vraisemblable d'après la bibliographie que dans les sols calcaires ou saturés de Ca (pH = 8) les engrais phosphatés solubles, surtout s'ils ont été localisés par bandes ou sous forme de granules, forment des phosphates calciques cristallisés, susceptibles de laisser un résidu de phosphates calciques basiques, dont le produit de solubilité est inférieur au produit des activités des ions formateurs régnant dans le milieu avant l'application de l'engrais. Les recherches préliminaires que nous avons conduites à cet égard n'ont pas confirmé que des granules de superphosphate répartis dans le sol l'aient moins enrichi en PO_4''' isotopiquement diluable que le mélange intime du même superphosphate en poudre avec le sol. Peut être notre technique expérimentale n'a-t-elle pas permis une évolution suffisante des phosphates formés au voisinage des granules. Nous pensons poursuivre cette étude, qui pourrait apporter un élément de réponse à une question qui nous paraît toujours fondamentale et toujours non résolue, notamment en ce qui concerne les sols calcaires ou les sols qu'il convient de maintenir saturés de Ca pour leur assurer un optimum de stabilité structurale. Est-il nécessaire, ou non, d'apporter indéfiniment au sol plus de phosphate que les récoltes n'en exportent pour maintenir à l'optimum la nutrition phosphorée des plantes?

4° L'emploi d'isotopes, sans apporter en l'espèce de données fondamentalement nouvelles, a permis de confirmer solidement, en ce domaine comme en beaucoup d'autres, des hypothèses qui n'étaient que vraisemblables d'après les recherches chimiques antérieures.

Reçu pour publication en novembre 1965.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE PH ON THE MOBILITY OF PHOSPHORIC IONS IN THE SOIL

The use of isotope P^{32} allowed to confirm with certainty some hypotheses suggested by former chemical investigations.

1° The rising of the pH of an acid soil up to about 8 increases the amount of PO_4''' ions isotopically dilutable in a short time, whilst reinforcing their adsorption by the mineral particles of the soil. Consequently, the decrease in the PO_4''' concentration of a solution through liming cannot be attributed to the formation of individualized calcic phosphates.

2° The acidification of a settled and initially neutral soil through application, during 35 years, of ammoniacal fertilizers, considerably enlarged the adsorbing power of the soil towards PO_4''', increasing at the same time the amount of isotopically dilutable PO_4''' ions. This increase, coupled with a decrease of the PO_4''' in solution does not therefore imply a real « fixation » of the PO_4''' ion through acidification of the soil.

3° The yearly application, for 35 years, of the same quantity per hectar of highly soluble phosphatic fertilizers (diammonium phosphate, superphosphate) or of Thomas slag on an initially neutral soil kept clean of vegetation, greatly increased the concentration of the aqueous extract in equilibrium and the amount of PO_4''' isotopically dilutable in a day (24 h).

The fraction of applied PO_4''' recovered in an isotopically dilutable state is of the same order for the most soluble phosphates as well as for the Thomas slag, even when there is no vegetation.

The natural calcic phosphate caused an only relatively small increase in the isotopically dilutable PO_4''' in this soil kept clean of vegetation, though, compared to the standard, it notably increased the PO_4''' concentration of the solution in equilibrium.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DES PH-EINFLUSSES AUF DIE BEWEGLICHKEIT DER PHOSPHORSAUREN IONEN IM BODEN

Durch Verwendung des Isotops P^{32} konnten die durch vorhergehende chemische Arbeiten aufgestellten Annahmen bestätigt werden :

1° Die Erhöhung des pH-Wertes eines sauren Bodens bis zu 8 ungefähr erhöht die Menge der isotopisch in kurzer Zeit verdünnbaren PO_4'''-Ionen, indem sie gleichzeitig ihre Adsorption durch die mineralischen Bodenteilchen verstärkt. Folglich kann man die Abnahme der PO_4''', Konzentration der Lösung infolge Kalkung über pH-7,0 nicht der Bildung individualisierter kalziumhaltiger Phosphate zuschreiben.

2° Die Ansäuerung eines ursprünglich neutralen Bodens durch 35-Jahre lange Anwendung ammoniakalischer Dünger hat das Adsorptionsvermögen des Bodens gegenüber PO_4''' gewaltig verstärkt und zugleich erhöhte sie die Menge isotopisch verdünnbarer PO_4'''-Ionen. Diese, an eine Verminderung des PO_4''' in Lösung gebundene Erhöhung bedingt also nicht eine wirkliche « Bindung » des PO_9'''-Ions infolge Ansäuerung des Bodens.

3° Die seit 35 Jahren zugeführte jährliche gleiche Menge pro Ha sehr löslicher Phosphatdünger (doppelammoniakalische, Superphosphat) oder Thomasmehl auf Boden ohne Vegetation und ursprünglich neutral, hat die Konzentration des sich im Gleichgewicht befindlichen wässrigen Extrakts und die Menge der isotopisch in 24 Stunden verdünnbaren PO_4'''-Ionen ganz gewaltig erhöht.

Die angewandte PO_4'''-Fraktion, die in isotopisch verdünnbarer Form wiedergefunden wurde, ist von gleicher Grössenordnung für die löslichsten Phosphate und die Thomasschlacken, selbst beim Fehlen jeglicher Vegetation. Das natürlich kalziumhaltige Phosphat hat das isotopisch verdünnbare PO_4''' in diesem Boden ohne Vegetation verhältnismässig wenig erhöht, obwohl es ganz deutlich die PO_4'''-Konzentration der im Gleichgewicht sich befindlichen Lösung gegenüber der Kontrolle erhöhte.

К вопросу изучения влияния pH на подвижность фосфорных ионов почв.

Г. БАРБЬЕ, Ж. БИЛАУС, Р. БОНИФАС.

РЕЗЮМЕ

Применение изотопа P^{32} привело к прочному подтверждению гипотез выдвинутых на основании пред'идущих химических работ :

1. Если довести pH кислой почвы приблизительно до 8,0 то увеличивается количество ионов PO_4''' способных быть изотопически разбавленными, и, в то-же время усиляется их адсорбция минеральными частицами почвы. Поэтому ослабление концентрации PO_4''' раствора известкованием при pH выше 7,0, нельзя приписывать образованию индивидуализованных фосфатов кальция.

2. Подкисление на месте почвы с первоначальной нейтральной реакцией при помощи внесения в течении 35-ти лет аммониакальных удобрений, в значительной мере усилило адсорбционную способность почвы по отношению к PO_4''' и в то-же время увеличило количество ионов PO_4''' способных к изотопическому разбавлению. Это увеличение, связанное в свою очередь с ослаблением концентрации PO_4''' в растворе, показывает что подкисление почвы не вызывает реального «закрепления» иона PO_4'''.

3. Ежегодное внесение одних и тех-же количеств хорошо растворимых фосфорных удобрений (би-аммониакальный фосфат, суперфосфат), или томасшлака на гектар в течении 35-ти лет, в почву поддерживаемую в оголенном состоянии, очень повысило концентрацию ионов PO_4''' в уравновешенном водном экстракте и увеличило количество ионов PO_4''' способных к изотопическому разбавлению за 24 часа. Фракция внесенных ионов PO_4''', найденная в форме способной к изотопическому разбавлению, представляет величины того-же порядка, что и для наиболее растворимых фосфатов, или томасшлака, даже при полном отсутствии растительности.

В почве поддерживаемой в оголенном состоянии, природный фосфат кальция, несмотря на вызванное им, по сравнению с контролем, повышение концентрации ионов PO_4''' в уравновешенном водном растворе, увеличил, сравнительно немного количество ионов PO_4''' способных к изотопическому разбавлению.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Barbier G., Chabannes J., 1949. Sur le mécanisme de l'adsorption des phosphates par divers constituants des argiles des sols. *Ann. agron.*, **19**, 343-379, notamment 374-376.

(2) Consulter Demolon A., 1956. *Croissance des végétaux cultivés*, 5e édition, p. 253. Dunod, Paris.

(3) Schoën U., Barbier G., Hénin S., 1954. Sur l'évolution des phosphates calciques dans les conditions du sol. *Ann. agron.*, **24**, 441-457.

(4) Radet E., 1958. Évolution de phosphates hyposolubles dans les sols de craie (1re note). *Assoc. Franç. pour l'Étude du Sol*, nº 1, 102-108.

(5) Barbier G., Haas Árpádné, 1961. Contribution à l'étude de l'acide phosphorique de terres calcaires. *Ann. agron.*, **12**, 425-433.

(6) Lindsay W. L., Taylor A. W., 1960. Phosphate reaction products in soil and their availability to plants. 7th intern. Congr. Soil Sci., Madison, vol. III, 580-589.

(7) Jackson M. L., 1962. *Soil Chemical analysis*. 3e édition, 159-162. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs N. J.

(8) *Ibid.*, 144-145.

(9) Barbier G., Chabannes J., Miallet P., 1946. Absorption des ions phosphoriques à la surface des colloïdes argileux en liaison avec les alcalino-terreux. *Ann. agron.*, **16**, 7-33.

(10) Trocmé S., Barbier G., 1948. Vitesse de décomposition des scories dans le sol selon leur vitesse de mouture. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 799-803.

(11) Barbier G., Mlle Tyszkiewicz, 1952. Mobilité des ions phosphoriques fixés dans le sol, étudiée au moyen de P^{32}. Ass. Int. Étude du Sol. Conférence de Dublin, 1952, vol. II, 79-83.

Ann. agron., 1965, **16** (6), 625-635.

CONTROLE DE LA SALINITÉ DES SOLS

Madeleine RICHARD et P. GOUNY

Station d'Agronomie
Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, Montfavet (Vaucluse)

SOMMAIRE

Les auteurs étudient les rapports entre la pression osmotique, la conductivité et la teneur en sels dissous des extraits aqueux des sols. Ils passent en revue les divers modes d'extraction utilisés et les comparent entre eux. Ils étudient les effets de la dilution sur les quantités des différents ions extraits.

I. — INTRODUCTION

Lors d'une étude pratique de la salinité des sols, il est commode d'assimiler les échanges d'eau et d'éléments minéraux entre le sol et les racines à des échanges entre solutions séparées par des parois semi-perméables. Comme tels, ils sont régis par la pression osmotique des solutions mises en présence.

La plante puise dans la solution du sol les éléments minéraux qui lui sont nécessaires. Mais, lorsque la concentration de cette solution s'élève au-dessus d'un certain seuil, sa pression osmotique devient supérieure à celle du suc cellulaire et la pénétration des éléments minéraux dans la plante devient impossible. La présence de sels solubles, en quantité excessive, dans le sol est donc susceptible de jouer un rôle néfaste dans l'assimilation des éléments nutritifs par les racines, leur dissolution dans l'eau présente dans le sol ayant pour effet une augmentation de la pression osmotique, ceci en dehors de toute question de toxicité particulière à certains ions.

II. — CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La pression osmotique d'une solution contenant 1 molécule-gramme d'un non-électrolyte dans 22,4 litres est de 1 atmosphère. Dans le cas d'un électrolyte, la dissociation a pour effet d'accroître dans la solution le nombre « d'individus chimiques », la pression osmotique d'une solution d'une molécule-gramme d'un électrolyte dans 22,4 litres deviendra :

P.O. = 1 atmosphère × i ;
i (coefficient d'ionisation) = 1 + $(x\text{-}1)d$;
(x = nombre d'ions donnés par la molécule dissociée) ;
(d = degré de dissociation).

L'augmentation de la pression osmotique par la dissolution d'un sel sera donc liée à la nature de ce sel. Tous les sels ne présenteront pas le même danger pour les cultures. L'exemple des divers sels potassiques est particulièrement intéressant.

Une molécule-gramme de ClK dans 22,4 l produit une pression osmotique de :

$$1 \text{ atmosphère} \times (1 + d) \text{ puisque } x = 2$$

Une molécule-gramme de SO_4K_2 dans 22,4 l produit une pression osmotique de :

$$1 \text{ atmosphère} \times (1 + 2\,d) \text{ puisque } x = 3$$

Pour obtenir un même apport de potasse, il faudra 2 molécules-grammes de ClK pour une de SO_4K_2, soit des augmentations de pression osmotique :

pour ClK 2 atmosphères × (1 + d ClK)
pour SO_4K_2 1 atmosphère × (1 + $2d_{SO_4K_2}$)

Pour un même enrichissement en potasse, on atteindra plus facilement le seuil critique avec ClK qu'avec SO_4K_2.

Dans la pratique, on substituera à la mesure délicate de la pression osmotique celle plus simple, de la conductivité C. Celle-ci étant, elle aussi, fonction de la concentration en molécules et ions libres, peut lui être reliée par la relation :

$$\text{P.O.} = K \times C$$

K étant une constante dont la valeur est variable suivant le sel dissous. JACKSON (1958), donne :

K = 0,36 pour NaCl, KCl
K = 0,30 pour des sels du type MX_2 ou M_2X
K = 0,28 pour $MgSO_4$

ces facteurs étant déduits de mesures d'abaissement du point de congélation notées dans les *International Critical Tables*.

La conductivité d'une solution est la conductance de cette solution mesurée entre des électrodes de 1 cm² de surface et distantes de 1 cm. La résistance étant mesurée en ohms, la conductance s'exprimera en mhos, la conductivité en mhos/cm. Dans le cas d'extraits aqueux des sols, les conductivités étant en général assez faibles, il est d'usage courant de les exprimer en millimhos/cm = 10^{-3} mhos/cm.

Une relation linéaire existe entre la conductivité d'une solution et sa concentration en sels trouvés par analyse. Elle est donnée par JACKSON, d'après FIREMAN et REEVE (1949) et peut s'exprimer par la relation :

$$\text{Méq de sels par litre} = 12{,}5\ C \text{ mmhos/cm.}$$

En fait, la conductivité des solutions salines est sensiblement affectée par la température. Les divers coefficients indiqués ci-dessus sont valables pour des mesures faites à la température de 25°. Lorsque la température diminue de un degré, la conductivité diminue environ de 2 pour cent.

Le facteur 12,5 est un facteur moyen, il peut varier de 8 à 20 suivant la nature du sel, et augmente dans l'ordre NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Na_2SO_4, $CaSO_4$, $MgSO_4$, $NaHCO_3$, ceci d'après des résultats publiés dans *International Critical Tables*.

III. — ÉTUDE DES SOLUTIONS EXTRAITES D'UN SOL

Les divers modes d'extraction qui sont en usage, utilisent des rapports sol-eau variables : extraits saturés, extraits 1/1, 1/2 ou 1/5.

Si l'on admet pour les différents sels pouvant être présents dans le sol, un poids moléculaire moyen de 51 (JACKSON, 1958), la relation de FIREMAN et REEVE donnant la concentration en sels de la solution devient :

$$\text{ppm de sels en solution} = 640 \times C \text{ mmhos/cm}$$
$$\text{p. 100 de sels en solution} = 0{,}064 \times C \text{ —}$$

Le pourcentage de sels dans le sol s'exprime en fonction du volume d'eau utilisé pour l'extraction :

$$\text{p. 100 de sels dans le sol} = 0{,}064 \times C \times \frac{\text{p. 100 d'eau dans le sol à l'extraction}}{100}.$$

A — *Extrait saturé*

JACKSON (1958), définit le pourcentage de saturation d'après SCOFIELD (1932), comme la « quantité maximum d'eau que l'on peut ajouter à un sol sans que de l'eau vienne se rassembler dans une dépression produite à la surface de l'échantillon ».

L'avantage de l'extrait saturé sur les divers autres modes d'extraction est qu'il se rapproche plus qu'eux des conditions offertes par la nature : le volume d'eau à ajouter à l'échantillon — pourcentage de saturation — dépend en effet de la texture du sol et se rattache ainsi à la capacité de rétention au champ (tabl. 1, JACKSON), alors, que pour les autres extraits le volume d'eau est indépendant de la texture et peut même, pour des extraits 1/1 de sol à granulométrie très fine, être inférieur au pourcentage de saturation.

TABLEAU I

Estimation des pourcentages d'eau pouvant être retenus par le sol

Types de sols	Point de flétrissement	Capacité de rétention au champ	Saturation
Sableux	1	2	4
Limon sableux	4	8	16
Limon fin....	10	20	40
Argileux	25	50	100
Tourbeux.....	35	70	140

Le pourcentage de sels solubles dans un sol calculé d'après la conductivité de l'extrait saturé sera :

$$C \times 0{,}064 \times \frac{\text{Pourcentage de saturation}}{100}.$$

Les effets de la salinité du sol sur la végétation sont donc fonction du pour-

centage de sels qu'il renferme et de sa granulométrie. La seule détermination de l'extrait saturé intègre ces deux facteurs. Ceci est illustré par le diagramme nº 1 donné par le *U. S. Salinity Laboratory* (1954).

Un sol étant défini par sa capacité de saturation, ce graphique donne la relation existant entre, d'une part, sa teneur en sels, d'autre part, la pression osmotique et la conductivité de l'extrait saturé.

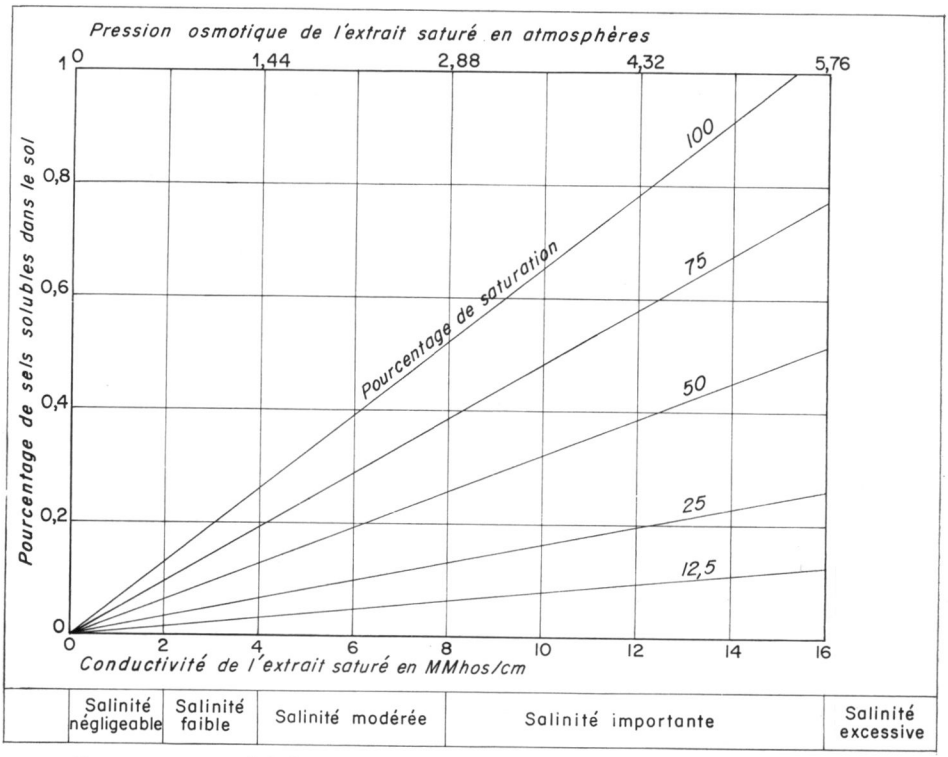


DIAGRAMME 1. — *Relation entre la teneur en sels et les caractéristiques de l'extrait saturé pour des sols présentant des pourcentages de saturation différents*

Une teneur en sels de 0,2 p. 100 pour un pourcentage de saturation de 75, donne un extrait saturé ayant une conductivité de 4 mmhos. Cette même teneur en sels, pour un sol à texture plus grossière dont le pourcentage de saturation est de 25, correspondra à une conductivité voisine de 12 mmhos/cm.

En reliant le diagramme nº 1, l'échelle des salinités donnée par les mêmes auteurs (*Salinity Laboratory, Riverside*), on voit immédiatement qu'une teneur en sels solubles de 0,2 p. 100 qui sera sans effets nuisibles sur la plupart des cultures pour un sol à texture fine (pourcentage de saturation 75), provoquera des accidents graves dans le cas d'un sol à texture plus grossière.

Il semble que les chercheurs américains qui travaillent sur la salinité des sols, utilisent largement les extraits saturés. Ceux-ci, s'ils ont l'avantage de se rapprocher des conditions naturelles, présentent l'inconvénient de leur préparation délicate et de la nécessité d'une connaissance très précise du pourcentage de saturation. Aussi leur préfère-t-on souvent les autres types d'extraction.

B — *Extraits 1/1*

Cent grammes de sol sont extraits par 100 ml d'eau.

Nous avons vu plus haut que le pourcentage de sels dans le sol peut être estimé à :

$$0{,}064 \times C \times \frac{100}{100} = 0{,}064 \times C.$$

C — *Extraits 1/2*

Cent grammes de sol sont extraits par 200 ml d'eau.

On estime le pourcentage de sels à :

$$0{,}064 \times C \times \frac{200}{100} = 0{,}064 \times C \times 2.$$

Ce mode d'extraction a été largement utilisé par des chercheurs travaillant dans des régions à climat humide, et, particulièrement, pour des sols de serres à forte fertilisation.

JACKSON cite les travaux de SWEET et PEECH (1945) et MERCKLE et DUNKLE (1944). Ces derniers ont comparé le facteur théorique 0,064 au résultat obtenu pour des sols de serres par pesée des sels après évaporation de l'extrait 1/2. Deux semaines après l'apport d'engrais, ils ont trouvé un coefficient 0,073 et après 4 semaines 0,094, ce qui signifie que le poids moléculaire des sels dissous est supérieur au chiffre de 51 précédemment adopté.

JACKSON a obtenu, pour des sols fortement chargés en engrais, un facteur de 0,120. Il semble d'après ces diverses études qu'un facteur moyen de 0,1 peut être retenu pour des extraits 1/2 de sols ayant reçu beaucoup d'engrais et à forte teneur en SO_4 et Ca.

D — *Extrait 1/5*

Cinquante grammes de sol sont extraits par 250 ml d'eau.

Le pourcentage de sels solubles est :

$$0{,}064 \times C \times 5 = 0{,}32\ C$$

TABLEAU 2

Pourcentage de sels		Classification des sols
Cl dominant %	SO_4 dominant %	
< 0,3	< 0,3	non salin
de 0,3 à 0,7	de 0,3 à 0,7	faiblement salin
de 0,7 à 1,0	de 0,7 à 1,5	modérement salin
de 1,0 à 1,5	de 1,5 à 2,0	fortement salin
> 1,5	> 2	très fortement salin (Solontchak)

Ce type d'extrait est très en faveur auprès des chercheurs hollandais et russes. Pour ces derniers, des informations intéressantes ont été rapportées d'U. R. S. S. par une équipe de chercheurs américains (*Report of a technical study group*, 1962), à l'occasion d'un voyage d'étude effectué en 1960. Le tableau 2 donne une classification des sols d'après leur salinité utilisée en U. R. S. S.

Le pourcentage de sels solubles est déterminé après évaporation, séchage et pesée de l'extrait 1/5.

E. — *Relations entre les conductivités de ces divers modes d'extraction*

Théoriquement, les rapports entre les conductivités des divers types d'extraits devraient être inversement proportionnels au volume d'eau utilisé pour l'extraction.

En réalité, ces rapports dépendent essentiellement de la nature des sels dominant dans les sols. En effet, pour des sols à forte prédominance de chlorures, très solubles, l'augmentation du rapport eau/sol ne produira qu'une faible augmentation de la dissolution des sels et le rapport sera peu éloigné du chiffre théorique.

Par contre, dans le cas d'une forte prédominance de sulfates, peu solubles, l'augmentation du rapport eau/sol permettra de dissoudre sensiblement plus de sel ; on aura alors des chiffres beaucoup plus élevés que ceux obtenus théoriquement.

Le U. S. Salinity Laboratory Staff (1951) cite des expériences réalisées par Wadleigh, Gauch et Kolisch (1951). Ces auteurs ajoutent à un même sol, de pourcentage de saturation voisin de 30, divers sels séparément. Ils mesurent les conductivités des extraits saturés (C_s), des extraits 1/1 (C_1) et des extraits 1/2 (C_2). Le tableau 3, donne les rapports des conductivités ainsi obtenues par comparaison au rapport théorique qui serait obtenu du simple fait de la dilution.

TABLEAU 3

Sols contenant :	$\frac{C_1}{C_s}$	$\frac{C_2}{C_s}$	$\frac{C_2}{C_1}$
NaCl	0,359	0,185	0,514
$CaCl_2$.....	0,356	0,191	0,534
$MgCl_2$.....	0,376	0,192	0,507
$NaHCO_3$.....	0,379	0,227	0,589
Na_2SO_4.....	0,590	0,355	0,600
$MgSO_4$	0,600	0,471	0,780
Théorique....	0,333	0,161	0,500

IV. — ÉTUDE DE DEUX GROUPES DE SOLS DE LA BASSE VALLÉE DU RHONE

Nous avons étudié la salinité de deux groupes de sols A et B. Chaque groupe provient d'une région différente et contient cinq échantillons de même origine. Ce sont tous des sols utilisés en culture maraîchère avec un très copieux apport d'en-

grais. Ils ne présentent pas de tendance à l'alcalinisation, leur pH étant normal pour des sols calcaires.

Ces deux groupes ont les caractéristiques moyennes suivantes (tabl. 4).

TABLEAU 4

	Groupe A	Groupe B
pH	7,9	7,9
Calcaire total (%)	5,8	45
Sables grossiers (%)	33,7	2,8
Sables fins (%)	20,4	51,9
Limons grossiers (%)	15,1	15,4
Limons fins (%)	17,2	19
Argiles (%)	13,0	10,5
Pourcentage de saturation.	38,4	43,6

Nous avons mesuré pour chaque échantillon les pourcentages de saturation et les conductivités des extraits saturés, 1/1, 1/2 et 1/5. Ces résultats sont présentés dans le tableau 5.

Les rapports entre les conductivités des différentes solutions sont présentés dans le tableau 6. Ce tableau fait apparaître une différence nette entre les deux groupes : pour le groupe A, les rapports pratiques s'éloignent beaucoup moins des rapports théoriques que pour le groupe B.

TABLEAU 5

Conductivités des quatre types d'extraits

N°	C_s	C_1	C_2	C_5
Groupe A				
1	8,40	4,50	2,65	1,24
2	3,50	1,77	1,02	0,52
3	2,17	0,96	0,55	0,28
4	1,28	0,54	0,30	0,16
5	0,54	0,25	0,14	0,08
Groupe B				
6	2,14	1,41	0,91	0,47
7	2,89	1,79	1,13	0,57
8	2,06	1,22	0,75	0,35
9	2,68	1,67	1,05	0,47
10	2,89	1,90	1,20	0,61

Nous avons effectué, pour chaque échantillon et pour chaque type d'extrait, les dosages des éléments suivants : Cl^-, SO_4^{--}, Ca^{++}, Na^+ et K^+.

Nous ne présentons ici que les résultats de quelques échantillons types et ceci sous forme de diagrammes donnant les quantités de sels dissous dans chaque type d'extrait pour un même poids de terre.

TABLEAU 6

Rapports des conductivités des quatres types d'extraits

N°	$\frac{C_1}{C_s}$		$\frac{C_2}{C_s}$		$\frac{C_5}{C_s}$		$\frac{C_2}{C_1}$	
	Théorique	Pratique	Théorique	Pratique	Théorique	Pratique	Théorique	Pratique
Groupe A								
1	0,42	0,54	0,21	0,32	0,08	0,15	0,5	0,59
2	0,40	0,51	0,20	0,29	0,08	0,15	0,5	0,58
3	0,35	0,45	0,18	0,26	0,07	0,13	0,5	0,57
4	0,35	0,42	0,18	0,24	0,07	0,13	0,5	0,56
5	0,40	0,46	0,20	0,25	0,08	0,15	0,5	0,56
Groupe B								
6	0,45	0,66	0,23	0,43	0,09	0,22	0,5	0,65
7	0,44	0,62	0,22	0,39	0,09	0,20	0,5	0,63
8	0,41	0,59	0,21	0,34	0,08	0,17	0,5	0,61
9	0,42	0,62	0,21	0,40	0,08	0,18	0,5	0,63
10	0,46	0,66	0,23	0,42	0,09	0,21	0,5	0,63

a) *Anions*

Le diagramme n° 2, chlorures, met bien en évidence le fait que la dilution est de peu d'effet sur la mise en solution des ions Cl^-, quelle que soit la teneur du sol. Il faut cependant remarquer, que, dans des sols très chargés en sels, la dissolution du chlore par l'extrait saturé peut être insuffisante.

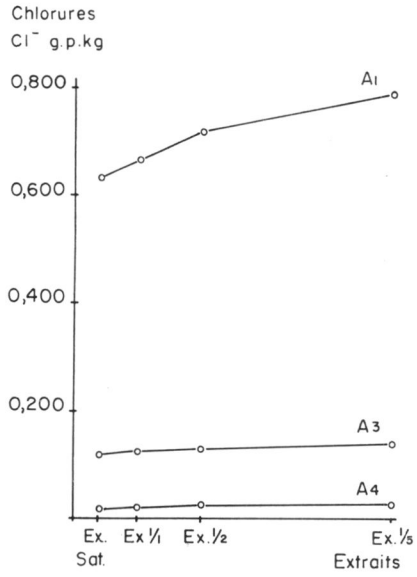


DIAGRAMME 2. — *Teneurs en chlorures des échantillons A_1, A_3 et A_4, mesurées d'après les extraits saturés 1/1, 1/2 et 1/5*

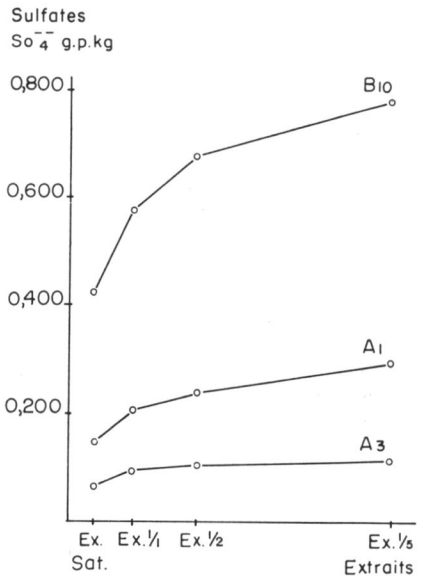


DIAGRAMME 3. — *Teneurs en sulfates des échantillons A_1, A_3 et B_{10}, mesurées d'après les extraits saturés 1/1, 1/2 et 1/5*

Le diagramme n° 3, sulfates, fait ressortir l'augmentation des ions SO_4^{--} avec la dilution, augmentation d'autant plus sensible que le sol est plus riche en ions SO_4^{--}. Ceci explique bien la différence relevée plus haut (tabl. 6), entre les rapports des conductivités pour les groupes A et B. Pour le groupe A, où la teneur des ions SO_4^{--} est faible, la dilution n'apporte qu'un faible accroissement de leur disso-

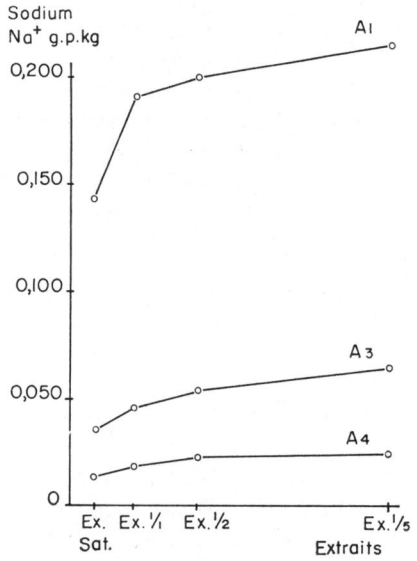


DIAGRAMME 4. — *Teneurs en sodium des échantillons A_1, A_3 et A_4, mesurées d'après les extraits saturés, 1/1, 1/2 et 1/5*

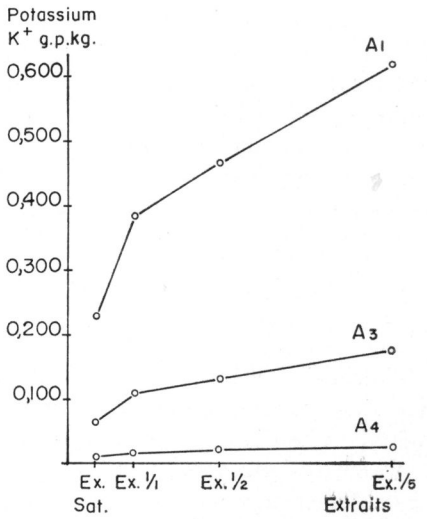


DIAGRAMME 5. — *Teneurs en potassium des échantillons A_1, A_3 et A_5, mesurées d'après les extraits saturés, 1/1, 1/2 et 1/5*

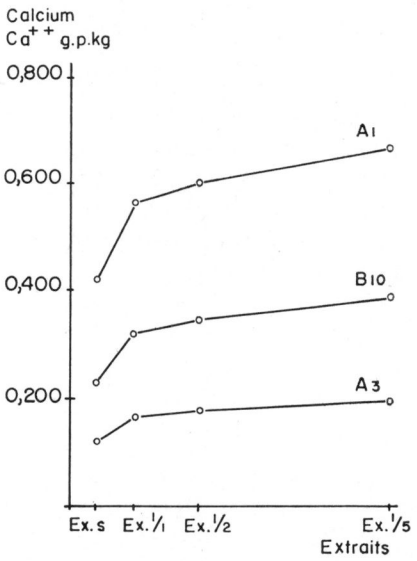


DIAGRAMME 6. — *Teneurs en calcium des échantillons A_1, A_3 et B_{10}, mesurées d'après les extraits saturés, 1/1, 1/2 et 1/5*

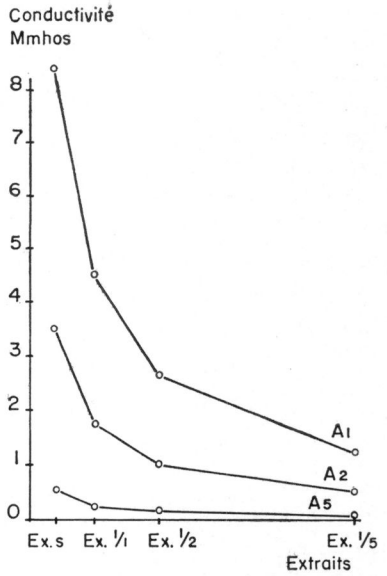


DIAGRAMME 7. — *Conductivités des extraits saturés, 1/1, 1/2 et 1/5 des échantillons A_1, A_2 et A_5*

lution et les conductivités sont peu affectées. Pour le groupe B, au contraire, l'ion SO_4^{--} étant prédominant sa dissolution est graduelle et les rapports des conductivités s'éloignent sensiblement des chiffres théoriques.

b) *Cations*

En ce qui concerne les cations, on observe dans les sols un comportement singulier du potassium. Les quantités de sodium et calcium extraites augmentent, en effet, lorsque l'on passe de l'extrait saturé à l'extrait 1/1 ; elles sont ensuite peu affectées par la dilution. Par contre, dans ces sols qui ont reçu de larges fumures potassiques, la quantité de potassium extraite augmente considérablement avec la dilution. Cela témoigne d'une modification des équilibres entre les cations retenus à l'état échangeable lorsque la dilution augmente. Il en résulte une plus grande libération de potassium échangeable (diagrammes nos 4, 5, 6, 7).

CONCLUSION

L'influence éventuelle sur la végétation des sels solubles renfermés par le sol est fonction des propriétés physiques de celui-ci. Elle sera d'autant plus forte que la capacité de rétention du sol considéré pour l'eau sera plus faible, car la concentration, et, par suite, la pression osmotique de la solution du sol sera alors plus élevée. Les mesures effectuées sur l'extrait saturé intégrent les deux facteurs : teneur en sels solubles et capacité de rétention. Elles présentent à ce point de vue un intérêt indiscutable.

On peut cependant, dans la pratique, être amené à utiliser d'autres dilutions. L'étude entreprise permet, dans les sols calcaires, de composition granulométrique sablo-limoneuse, de salinité faible à modérée, de relier entre elles les diverses déterminations.

On a ainsi mis en évidence, dans les solutions extraites du sol, une diminution de la concentration par rapport à l'extrait saturé, diminution qui n'est pas proportionnelle à la dilution, car celle-ci entraîne la mise en solution de quantités supplémentaires de sels. Ce phénomène, très sensible pour SO_4^{--} et K^+, est plus faible pour Ca^{++} et Na^+. Il se manifeste encore pour un élément totalement soluble, tel que Cl.

La relation existant entre l'extrait saturé et les extraits dilués est ainsi fonction de la granulométrie du sol et de la nature des sels dissous.

Reçu pour publication en novembre 1965.

SUMMARY

SOIL SALINITY TEST

The deliquescent salts contained in the soil play an important part in the assimilation of nutrients by plants. This is due to an increase in the osmotic pressure of the soil, as a result of their dissolution.

The osmotic pressure of a solution may be connected with the conductivity by a simple rela-

ion. The conductivity allows an approximate evaluation of the salts in solution, by adopting for these a mean molecular weight.

It is merely possible, by starting from the conductivity of the aqueous extracts and the water-percentage at extraction, to estimate the soluble salt content in the soil.

The saturated extract presents a definite advantage on the other method of extraction (1/1, 1/2, 1/5) because it only involves the soil texture. On the other hand, it seems to give weak results in the case of little soluble salts.

ZUSAMMENFASSUNG

PRÜFUNG DES SALZGEHALTES DER BÖDEN

Die im Boden vorhandenen löslichen Salze spielen eine wichtige Rolle in der Assimilation der Nährstoffe durch die Pflanze, infolge der Zunahme des osmotischen Drucks, bewirkt durch ihre Auflösung im Bodenwasser.

Der osmotische Druck einer Lösung kann mittels einer einfachen Relation an die Leitfähigkeit gebunden werden. Die Leitfähigkeit gestattet eine annähernde Schätzung der sich in Lösung befindlichen Salze, indem man für dieselben ein mittleres Molekulargewicht annimmt.

So kann man, von der Leitfähigkeit der wässrigen Bodenextrakten und der Wasserprozente beim Extrahieren ausgehend, den Gehalt an löslichen Bodensalzen schätzen.

Der gesättigte Extrakt hat einen unbestreitbaren Vorteil auf die andern Extrahierungstypen (1/1, 1/2,1/5), indem er alleinig die Bodentextur in Betracht zieht. Bei wenig löslichen Salzen hingegen sind die Resultate eher schwach.

Контроль засоленности почв.

М. РИШАР и П. ГУНИ.

РЕЗЮМЕ

Растворимые соли почвы играют важную роль в ассимиляции растениями питательных веществ, усиливая осмотическое давление почвенного раствора при растворении.

Осмотическое давление раствора может быть связано с проводимостью простым соотношением. Проводимость позволяет приблизительное определение солей раствора, если принять во внимание их средний моллекулярный вес.

Исходя от проводимости водных вытяжек почвы и процента воды при экстрагировании можно, таким образом определить содержание растворимых солей в почве.

Метод насыщенной вытяжки представляет определенные преимущества перед разными другими типами экстрагирования (1/1, 1/2, 1/5) так как только он один принимает во внимание механический состав почвы. И напротив, метод этот дает как-будто слабые результаты в присутствии слабо-растворимых солей.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

JACKSON M. L., 1958. *Soil Chemical Analysis*, 227-253. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. N. I.

REPORT of a TECHNICAL STUDY GROUP 1962. Agricultural Research Service. *U. S. Dept. Agric. Soil Salinity and Irrigation in the Soviet Union*, 26-29. U. S. Govt Prenting Office, Washington D. C.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali soils. *U. S. Dept. Agr. Handbook* 60, 7-33. U. S. Govt Prenting Office, Washington D. C.

Ann. agron., 1965, **16** (6), 637-661.

RECHERCHES SUR LA DÉSORPTION EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE DE L'ION AMMONIUM FIXÉ PAR LES ARGILES

R. CHAMINADE

Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Yvelines)

SOMMAIRE

Une technique permettant l'enregistrement en fonction de la température (200 à 650°) du dégagement d'ammoniac par des argiles renfermant de l'ammonium échangeable est décrite.

La courbe de désorption présente une allure caractéristique. Elle dépend du type d'argile et de la teneur en ammonium échangeable.

L'examen des courbes de désorption permet d'apporter des précisions sur le comportement de l'ion NH_4 dans son échange avec d'autres cations.

Les alternances d'humidification et de dessiccation, la dialyse, le broyage des argiles modifient les courbes de désorption de l'ion NH_4.

INTRODUCTION

Lorsqu'on chauffe à une température suffisamment élevée une argile ayant fixé des ions NH_4, l'activation des ions fixés provoque leur désorption avec dégagement d'ammoniac. On peut suivre ce dégagement par titrage, en fonction de la température (CHAMINADE, 1962, 1964).

TECHNIQUE

L'échantillon d'argile est placé dans un tube de quartz de 15 mm de diamètre présentant à sa partie inférieure une plaque poreuse de quartz fritté.

L'ammoniac dégagé au cours du chauffage est entraîné par un courant d'azote pur traversant trois flacons laveurs, les deux premiers renfermant du pyrogallate de potasse pour retenir les traces d'oxygène et le troisième de l'acide sulfurique à 5 p. 100. Un débit d'azote de 9 à 10 litres par heure

est suffisant pour entraîner l'ammoniac au fur et à mesure de son dégagement. L'un des flacons laveurs comporte un tube manométrique permettant de contrôler la pression. Un étalonnage de l'appareil fixe la pression correspondant au débit indiqué ci-dessus.

Chauffage

Le chauffage est réalisé dans un petit four électrique vertical. La désorption est étudiée entre des températures allant de 150 à 650°. Un programmateur-régulateur permet une montée très sensiblement linéaire de la température entre ces deux valeurs.

Dans les essais décrits ci-après, la vitesse de montée en température a été (sauf dans quelques essais pour lesquels les conditions seront précisées) de 114° en une heure.

Un thermo-couple relié au programmateur permet la régulation de la température ; un second thermo-couple placé au contact de la plaque de quartz fritté est relié à un enregistreur de température et permet à chaque instant le contrôle de la température de l'échantillon d'argile.

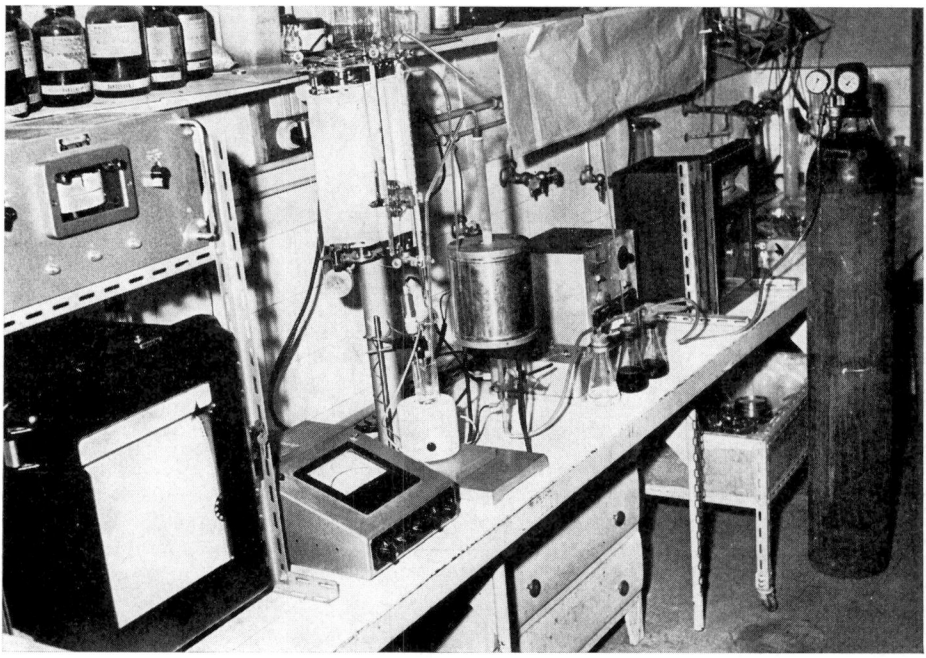


PHOTO 1. — *Appareillage utilisé pour l'étude de la désorption de* NH_4.

De gauche à droite : Enregistreur de température.
Régulateur de pH.
pH-mètre.
Dispositif de titrage et d'enregistrement.
Four électrique et tube de quartz.
Appareil de réglage du chauffage.
Programmateur-régulateur de température.
Tube d'azote.

Titrage de l'ammoniac dégagé

L'ammoniac entraîné par le courant d'azote est recueilli à l'aide d'un tube à dégagement présentant une fine ouverture à son extrémité, dans 25 ml d'eau bipermutée bouillie. Un agitateur magnétique assure l'homogénéité de la solution.

Le titrage de l'ammoniac dégagé se fait, à pH 6,0 à l'aide d'acide sulfurique N/100.

A cet effet, le pH est mesuré à l'aide d'une électrode de verre. Une vanne électronique, placée sur la burette renfermant l'acide titré, s'ouvre dès que le pH atteint 6,0 provoquant l'admission d'acide sulfurique dans la solution. La baisse de pH provoque la fermeture de la vanne.

Le niveau de l'acide dans la burette est repéré par une petite cellule photoélectrique solidaire d'un dispositif d'enregistrement.

On obtient ainsi l'enregistrement en fonction de la température — la variation de celle-ci étant linéaire en fonction du temps — du volume d'acide sulfurique correspondant à la neutralisation de l'ammoniac dégagé.

De nombreux essais préliminaires ont montré qu'il n'y avait aucune perte d'ammoniac avec le dispositif précédent.La précision du dosage d'ammoniaque est de l'ordre de $\pm$ 1 p. 100 pour des échantillons d'argile de 150 à 300 mg.

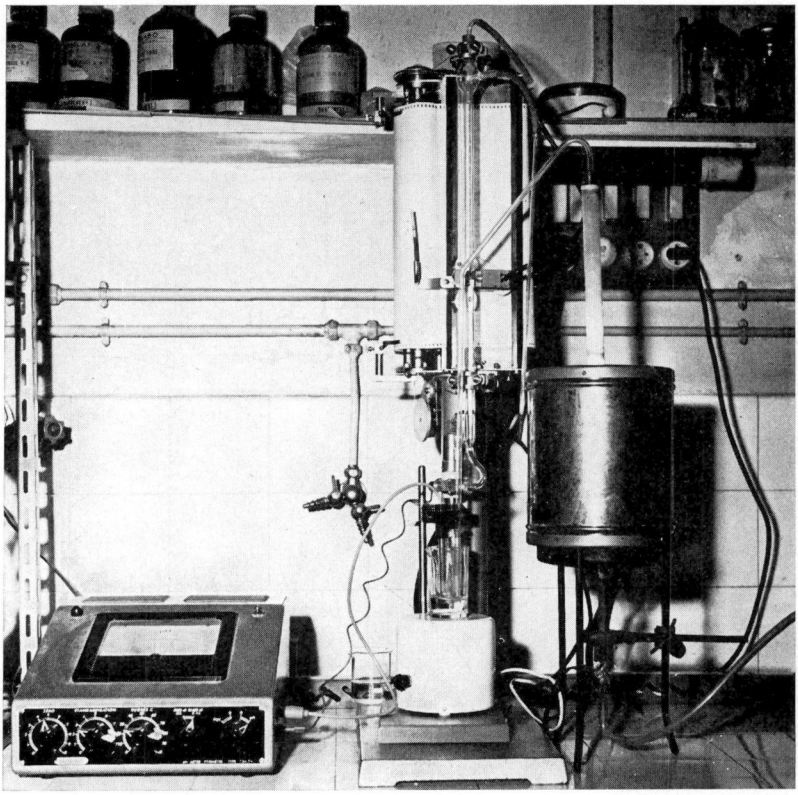


PHOTO 2.

A gauche : pH-mètre.

Au milieu, de bas en haut : Agitateur magnétique.
Vase recevant l'ammoniac dégagé.
Électro-vanne et burette renfermant l'acide sulfurique titré.
Cellule photo-électrique repérant le niveau de l'acide et dispositif d'enregistrement.

A droite : Four électrique et tube de quartz.

Traitement de l'échantillon

L'expérience porte sur un échantillon d'argile séparé dans les conditions habituelles : sédimentation 16 h sur une hauteur de 20 cm. L'échantillon est partiellement ou totalement saturé en NH_4. Pour obtenir l'échantillon saturé de NH_4 on procède à des traitements répétés à l'aide de $ClNH_4$, en solution normale et neutre. En général, cinq traitements, séparés par des centrifugations permettent une saturation complète. On lave ensuite à l'eau par centrifugation jusqu'à disparition de la réaction de l'ion Cl^-. L'échantillon lavé est séché à 80°, broyé au mortier et passé au tamis 80.

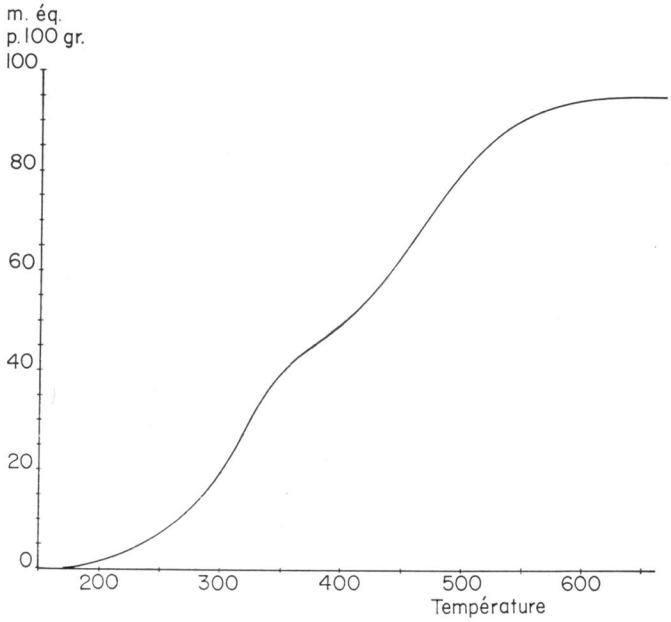
Le poids de l'échantillon utilisé dépend des caractéristiques de l'appareil. Dans les essais ci-dessous ce poids était de 153,2 mg. Dans le graphique d'enregistrement, 10 mm d'ordonnée correspondaient ainsi à 5 méq. NH_4 pour 100 g d'argile.

RÉSULTATS

La courbe ci-dessous (courbe 1) représente l'enregistrement de la désorption de NH_4 sur une montmorillonite saturée. Le chauffage a été réalisé de 150 à 650° avec une montée en température de 114° par heure.

Avant de tenter une interprétation de cette courbe il faut préciser qu'elle est parfaitement reproductible. Entre deux essais réalisés dans les mêmes conditions les points des deux courbes obtenues diffèrent de moins de 1 p. 100.

Dans une telle courbe, deux variables interviennent simultanément : la température et la quantité de NH_4 restant fixée.



COURBE 1. — *Courbe de désorption de NH_4 dans une montmorillonite NH_4*

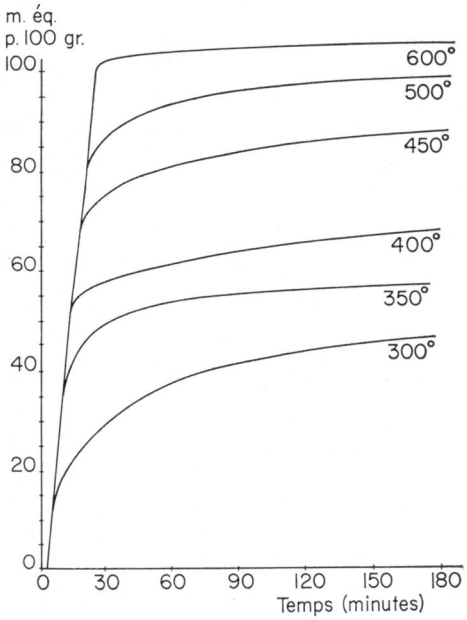
Si la vitesse de montée en température change, la courbe obtenue n'est pas superposable à la précédente. La valeur absolue de la quantité d'ammoniac dégagé à une température déterminée ne peut donc être considérée comme caractéristique que dans des conditions expérimentales définies.

Pour apporter une précision sur ce point, des essais ont été réalisés à températures constantes en maintenant l'échantillon trois heures à la température envisagée. Ces essais ont été faits sur une montmorillonite NH_4 saturée renfermant 105 méq NH_4 pour 100 g d'argile. Les courbes ci-après (courbes 2) représentent en fonction du temps le dégagement d'ammoniac.

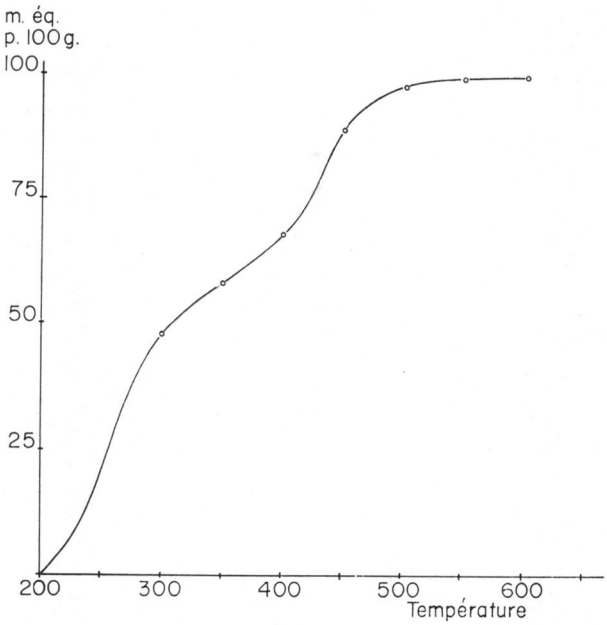
Les courbes ont l'allure caractéristique de courbes de désorption, la vitesse de dégagement diminuant en même temps que la quantité de NH_4 restant fixée.

Au bout de 3 h la vitesse de dégagement devient extrêmement lente et la courbe tend vers une asymptote.

On constate que la quantité de NH_4 dégagée, pour des températures inférieures à 650°, n'atteint pas la quantité totale d'ammonium fixé.



COURBE 2. — *Désorptions à températures fixes*



COURBE 3. — *Courbes de désorption avec maintien de chaque température pendan 3 h.*

A 300°, par exemple, l'asymptote correspond à 47 méq. NH_4 pour 100 g alors que la quantité totale représente 105 méq. Tout se passe comme si cette température ne provoquait l'activation que d'une partie des ions NH_4 fixés.

En joignant les points correspondant à la limite des quantités désorbées par chauffage pendant 3 h à différentes températures comprises entre 300 et 650° (300-350 ... etc.) on obtient une courbe qui n'est pas superposable à celle obtenue dans les conditions habituelles (variation continue de la température de 200 à 600° en 3 h. 1/2) mais qui conserve la même forme. En particulier le point d'inflexion remarquable vers 400° se retrouve dans les deux courbes (courbe 3).

On peut donc dire que l'allure de la courbe et les particularités qu'elle présente sont bien caractéristiques de la nature de l'argile et du comportement de l'ion NH_4 au cours de sa désorption en fonction de la température.

Interprétation de la désorption de NH_4 fixé par la montmorillonite

La courbe de désorption (courbe 1) présente une forme caractéristique en double S, avec trois points d'inflexion vers 320°, 400°, 450°.

En raison de la présence de deux variables au cours de la désorption (température et quantité de NH_4 restant) la forme en S de la courbe est parfaitement explicable. La vitesse de désorption croît d'abord avec l'élévation de la température, passe par un maximum puis décroît du fait de la diminution de la quantité restante de NH_4.

Cette explication est valable si l'on suppose que, à l'origine, l'énergie d'activation est identique pour la totalité des ions NH_4 fixés.

Pour expliquer le double S et le point d'inflexion à 400° on peut supposer qu'il se produit à cette température un mécanisme de fermeture des feuillets de l'argile entraînant un ralentissement dans le dégagement d'ammoniac, qui s'accélère par la suite du fait de l'élévation de la température.

Toutefois, une telle hypothèse ne peut concerner que les ions NH_4 se trouvant en position inter-feuillets au moment de la fermeture de ceux-ci.

Par ailleurs, l'expérience met en évidence les faits suivants :

1° Dans des montmorillonites K-NH_4 préparées, soit à partir de montmorillonites K, soit à partir de montmorillonites NH_4, les courbes de désorption, pour une teneur donnée en NH_4, sont très différentes (courbes 14-15).

La courbe de désorption révèle donc, en dehors de tout mécanisme de fermeture des feuillets, des différences dans les « positions » des ions NH_4 se traduisant par une variation des vitesses de désorption.

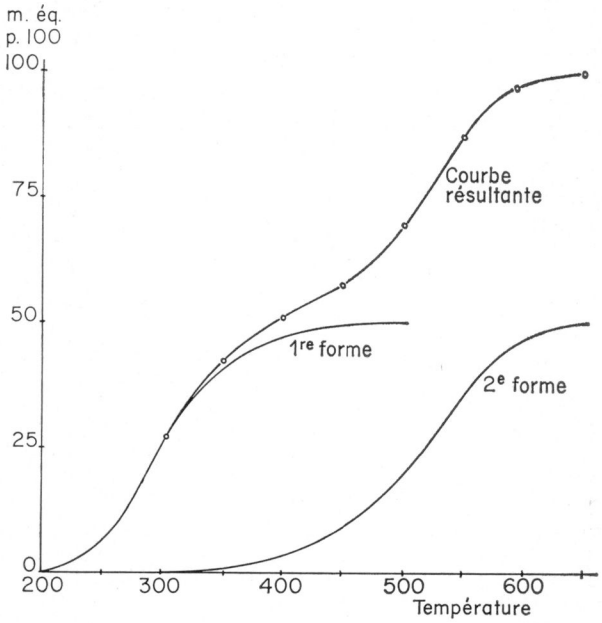
2° Les montmorillonites NH_4-Mg, NH_4-Ca, NH_4-Na pour des teneurs en NH_4 inférieures à 60 méq. présentent des courbes de désorption régulières, à un seul point d'inflexion bien que la désorption commence à des températures de l'ordre de 250°.

Or, l'examen de la courbe de désorption de la montmorillonite saturée montre que la vitesse de désorption commence à décroître à 325°. La vitesse minimum est atteinte à 400° ; elle croît ensuite.

Si la fermeture des feuillets était responsable de cette diminution de la vitesse de désorption, elle devrait se manifester dans tous les cas, à la même température.

Ces faits sont à l'appui de l'hypothèse d'après laquelle le point d'inflexion à 400° traduit l'existence dans la montmorillonite de deux modes de liaison des ions NH_4 nécessitant des énergies d'activation variables.

La courbe expérimentale obtenue serait la superposition de deux courbes en S (courbes 4). La première commençant à des températures basses (200°) et plafonnant vers 500° ; elle correspondrait aux ions NH_4 fixés avec une énergie relativement faible. La seconde courbe commencerait vers 350° et plafonnerait entre 600 et 650° ; elle correspondrait aux ions NH_4 plus énergiquement fixés. Il est très vraisemblable que ces faits sont en relation avec l'existence de sites de fixation sur des surfaces plus ou moins accessibles.



COURBES 4. — *Schéma d'une courbe de désorption résultant de l'existence de deux modes de fixation des ions NH_4*

Les courbes ne peuvent donner, en valeur absolue, les proportions d'ions NH_4 correspondant aux deux modes de fixation. La désorption de la seconde forme, commence en effet avant que ne soit terminée la désorption de la première.

Dans l'interprétation des courbes, nous avons pris en considération la quantité de NH_4 désorbée à 400°.

Pour la montmorillonite NH_4 la répartition est la suivante :

$< 400°$: 49 méq. (51 p. 100) ;
$> 400°$: 47,5 méq. (49 p. 100).

Malgré un certain caractère conventionnel, cette donnée expérimentale fournit d'intéressantes précisions sur la « position » des ions NH_4 fixés lorsque les argiles sont soumises à divers traitements.

Comportement de différentes argiles

Les résultats relatifs à la montmorillonite saturée d'ions NH_4 ont été exposés plus haut.

Des essais ont été réalisés sur une illite, une vermiculite et une argile extraite d'un sol de limon.

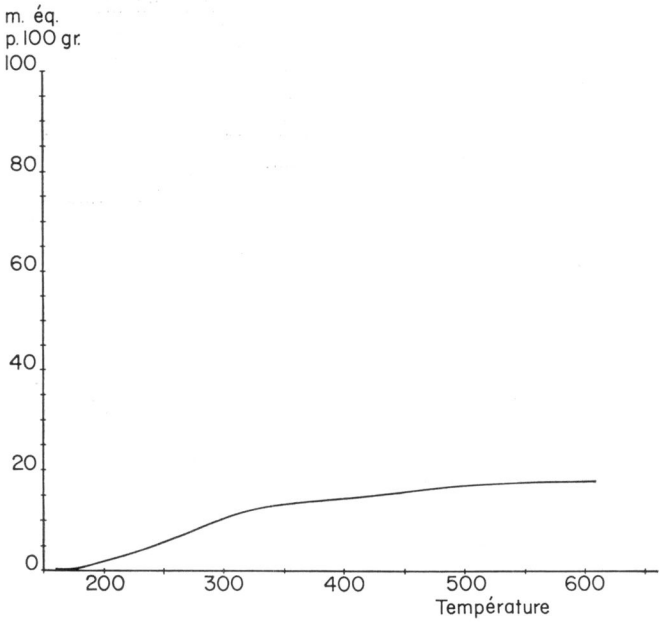
La séparation de la fraction inférieure à 2 μ a été effectuée par la technique habituelle : sédimentation sur 20 cm pendant 16 h.

Les échantillons d'argile ont été ensuite saturés d'ions NH_4 par traitements répétés à l'aide d'une solution normale de chlorure d'ammonium neutre, puis lavages à l'eau jusqu'à disparition de la réaction de l'ion Cl^-.

Illite.

Il s'agit ici d'une illite très « fermée » à faible capacité d'échange (18 méq.).

La courbe de désorption (courbe 5) montre un début rapide du dégagement de NH_4.



COURBE 5. — *Désorption de NH_4 dans une illite*

A 300°, 55 p. 100 de la quantité totale fixée a été désorbée, cette proportion atteint 72 p. 100 à 350°.

Un très léger point d'inflexion semble se dessiner à 400° mais le dégagement au-dessus de cette température reste faible. La répartition des ions NH_4 se présente de la façon suivante :

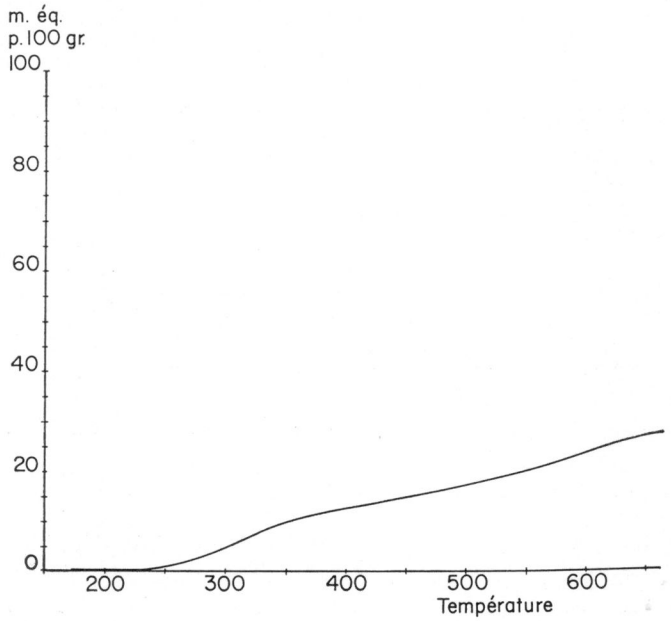
$< 400°$: 14 méq. (77 p. 100),
$> 400°$: 4 méq. (23 p. 100).

Ces résultats s'expliquent par le fait qu'il s'agit ici d'une illite très fermée et que les sites de fixation internes sont inaccessibles aux échanges. La presque totalité de l'ammonium fixé occupe ainsi des positions externes désorbables à basse température.

Vermiculite.

L'extraction de la fraction $< 2\ \mu$ de la vermiculite a été précédée d'un léger broyage.

L'argile extraite n'avait qu'une capacité d'échange de 30 méq. La courbe de désorption (courbe 6) présente la forme d'un double S avec un point d'inflexion très net à 400° indiquant la présence dans ce type d'argile des deux modes de fixation.



COURBE 6. — *Désorption de NH^4 dans une vermiculite*

La répartition des ions NH_4 se présente de la façon suivante :

$< 400°$: 12,5 méq. (42 p. 100),
$> 400°$: 17,5 méq. (58 p. 100).

Argile d'un sol de limon.

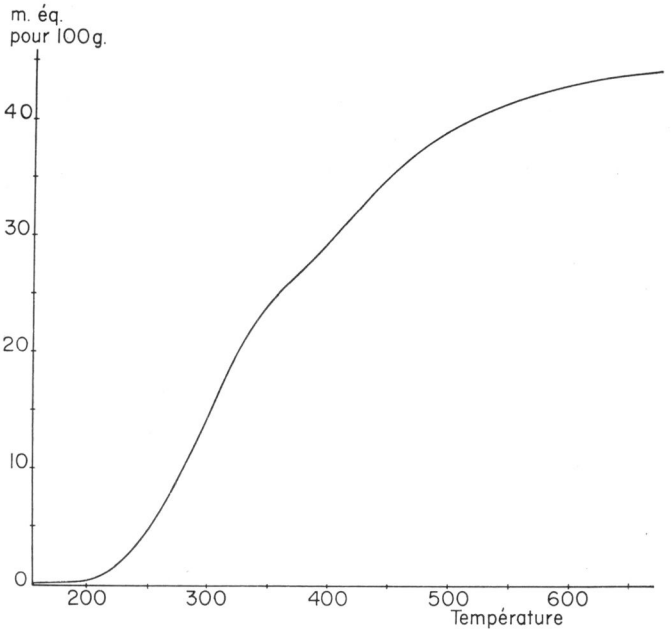
Il ne s'agit plus ici d'une argile définie mais d'un mélange comportant de la kaolinite, de l'illite, de la montmorillonite.

La capacité d'échange est de 44 méq. La courbe de désorption (courbe 7) a été établie sur un poids d'argile plus élevé (354,7 mg au lieu de 153,2) afin d'avoir des ordonnées de même longueur que dans le cas de la montmorillonite.

Le point d'inflexion à 400° apparaît nettement tout en étant beaucoup moins marqué que dans la montmorillonite.

Les ions NH_4 sont répartis de la façon suivante :

$< 400°$: 29 méq. (66 p. 100),
$> 400°$: 15 méq. (34 p. 100).



COURBES 7. — *Désorption de NH_4 dans une argile extraite d'un sol de limon.*

Comparaison de montmorillonites à teneur variable en ions NH_4.

L'étude a porté sur des montmorillonites NH_4-Ca, NH_4-Mg, NH_4-K, NH_4-Na, de teneurs variables en NH_4. Les échantillons ont été préparés, soit en traitant des montmorillonites NH_4 par des chlorures de Ca, Mg, Na ou K, soit en partant de montmorillonites Ca, Mg, K, Na traitées par du chlorure d'ammonium.

Les courbes ci-après donnent les résultats obtenus (courbes 8-9-10-11-12-13-14-15):

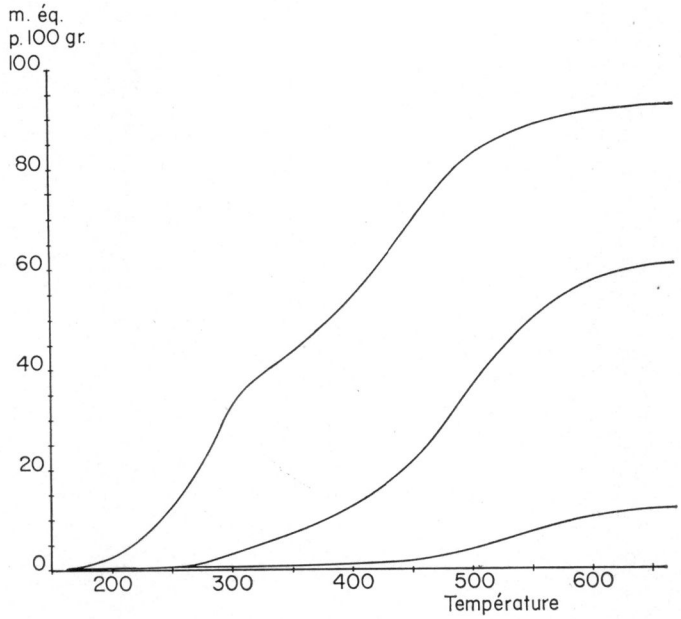
Interprétation.

a) Déplacement par l'ion NH_4 des cations métalliques fixés.

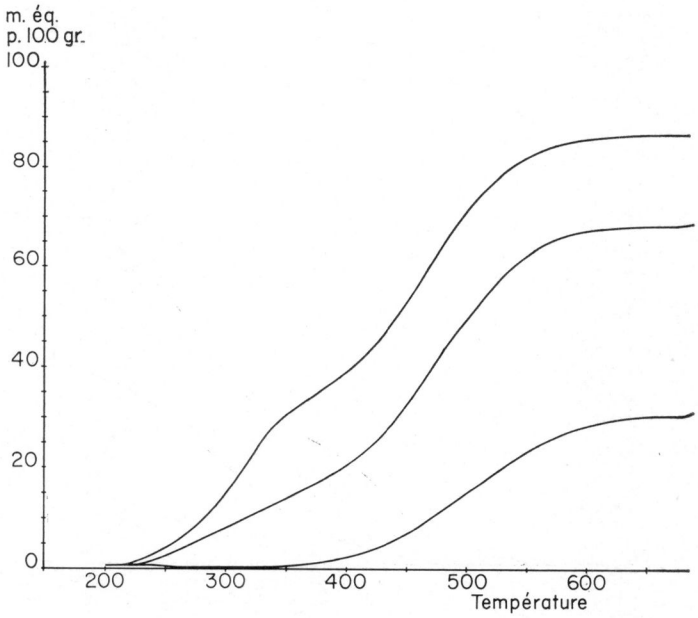
Quelle que soit la nature des cations fixés, l'allure du déplacement de ces cations par l'ion NH_4 reste toujours la même. Les ions NH_4 se fixent en priorité sur les positions désorbables à haute température.

b) Déplacement des ions NH_4 fixés, par d'autres cations métalliques.

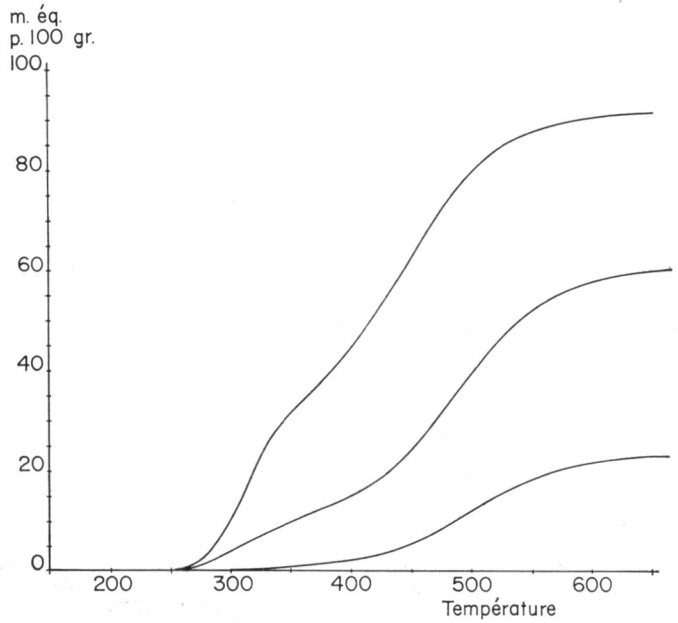
1° En ce qui concerne les ions Ca, Mg, Na, ceux-ci déplacent en priorité les ions NH_4 fixés sur les positions désorbables à basse température.



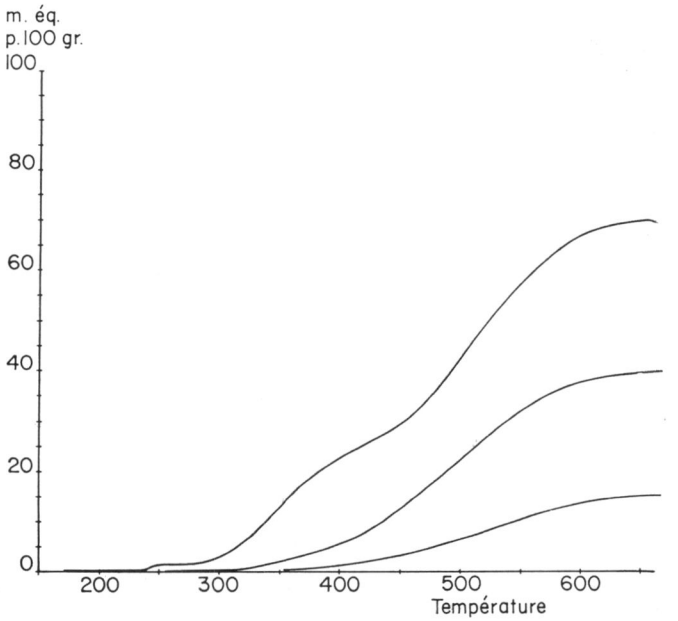
COURBES 8. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-Ca, préparées à partir de montmorillonite Ca*



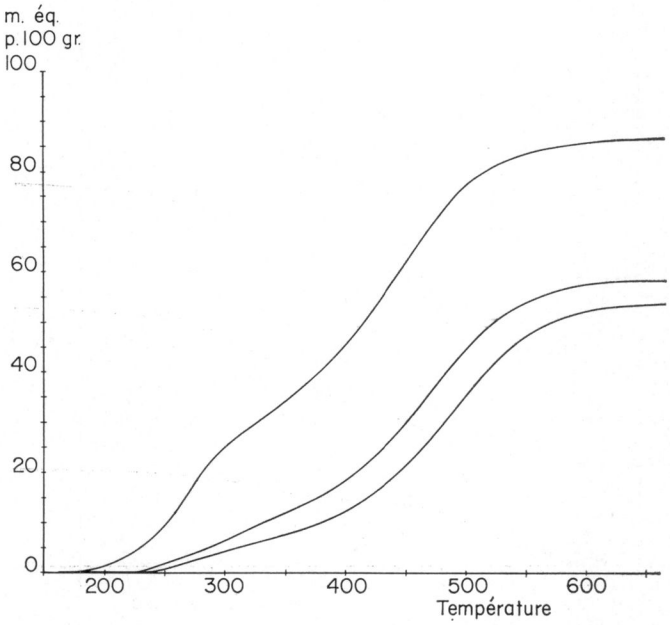
COURBES 9. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-Ca, préparées à partir de montmorillonite NH_4*



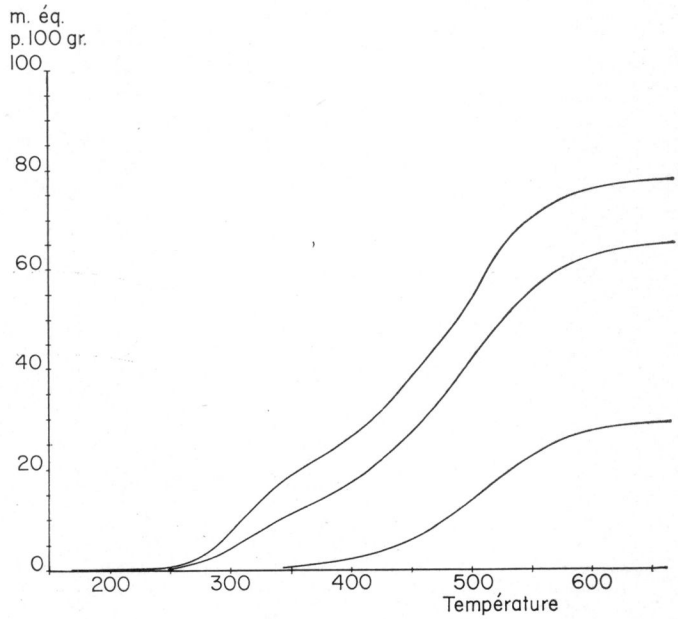
COURBES 10. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-Mg, préparées à partir de montmorillonite Mg*



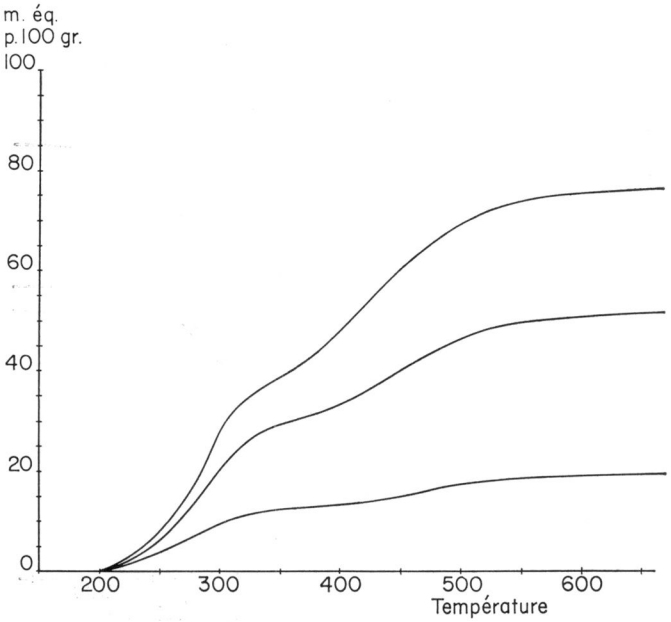
COURBES 11. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-Mg, préparées à partir de montmorillonite NH_4*



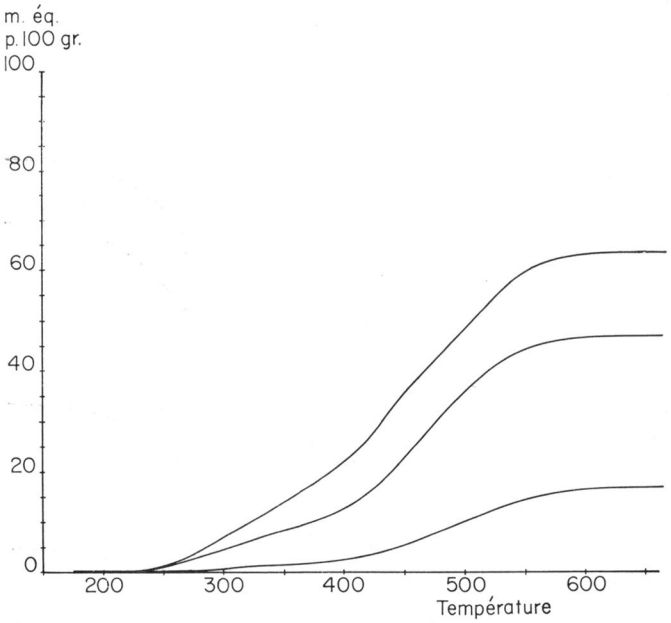
COURBES 12. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-Na, préparées à partir de montmorillonite Na*



COURBES 13. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-Na. préparées à partir de montmorillonite NH_4*



COURBES 14. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-K, préparées à partir de montmorillonite NH_4*



COURBES 15. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH_4-K, préparées à partir de montmorillonite K*

Il résulte des deux faits précédents que les montmorillonites NH_4-Ca, NH_4-Mg, NH_4-Na présentent, pour une quantité définie de NH_4 fixé, des courbes de désorption très sensiblement identiques, quel que soit le mode de préparation des argiles (à partir de montmorillonite NH_4 ou à partir de montmorillonites Ca, Mg, Na).

2° L'ion K a un comportement particulier. Contrairement aux précédents, il déplace en priorité les ions NH_4 occupant les positions désorbables à température élevée.

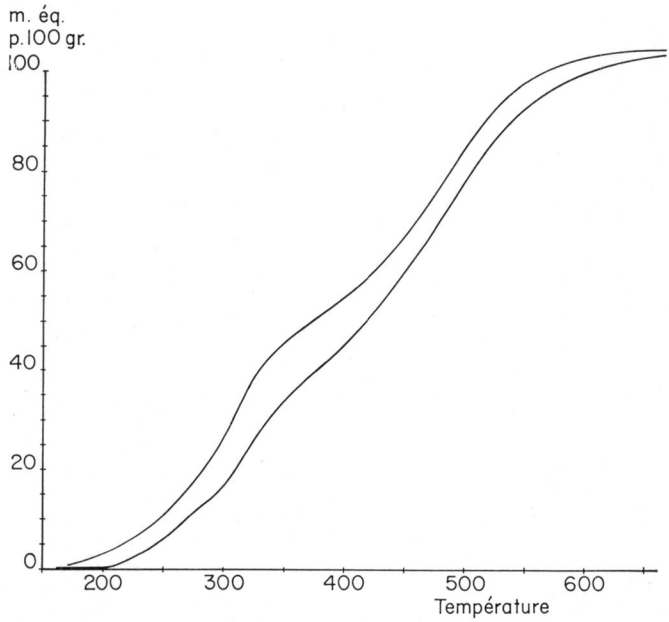
Il en résulte une différence considérable dans les courbes de désorption des montmorillonites NH_4-K suivant qu'elles sont préparées à partir de montmorillonite NH_4 ou de montmorillonite K (courbes 14-15).

Influence des alternances d'humidification et de dessiccation sur le comportement de l'ion NH_4

Montmorillonite NH_4

Des échantillons de montmorillonite NH_4 ont subi 10 alternances d'humidification et de dessiccation à 80°.

Les courbes 16 représentent la désorption comparée dans un échantillon n'ayant subi qu'une dessiccation et dans l'échantillon séché 10 fois.



COURBES 16. — *Influence des alternances d'humidification et de dessiccation sur une montmorillonite NH_4*

On voit que, dans le second cas la courbe de désorption est décalée vers les températures élevées. La différence maximum entre les deux courbes se situe entre 350 et 400° et représente 10 méq. NH_4.

Dans les échantillons séchés une fois et dix fois, on a extrait l'ammonium échangeable par épuisement sur filtre à l'aide d'une solution de KCl, N.

Pour obtenir une solution de KCl complètement débarrassée d'ammonium, on a préparé une solution de KCl N/2.

Le volume de cette solution a été réduit de moitié par ébullition, après alcalinisation par quelques gouttes de potasse.

L'extraction de l'ammonium échangeable a été faite par fractions de 100 ml de solution de KCl.

Le bilan de l'extraction est le suivant :

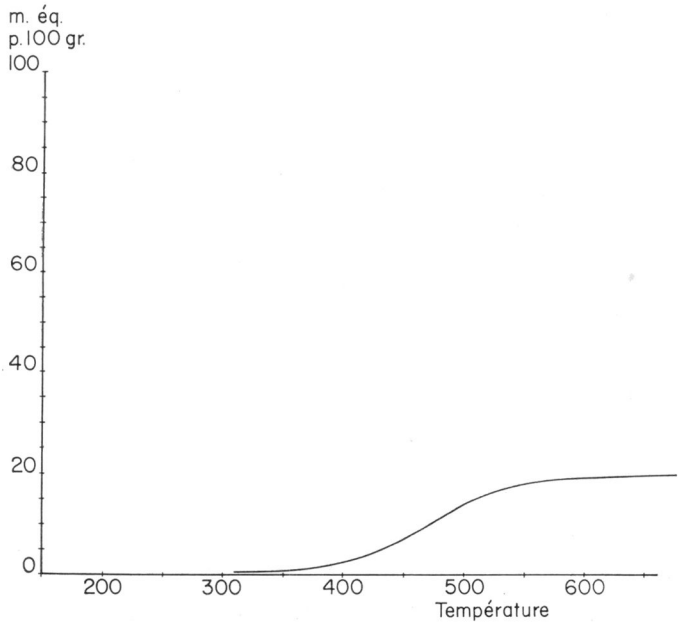
1° Argile ayant subi 1 dessiccation (épuisement sur 928,5 mg).

1re fraction de 100 cc : 99 méq. NH_4 pour 100 g d'argile.
2e fraction de 100 cc : 0,16 méq. NH_4 pour 100 g d'argile.

La désorption par la chaleur avait donné 104,5 méq. pour 100 g. La différence entre les 2 chiffres (5 p. 100 de la quantité totale) est trop faible pour être significative ; elle ne peut qu'indiquer une tendance, après une seule dessiccation, du passage d'une faible quantité de NH_4 à l'état non échangeable.

2° Argile ayant subi 10 dessiccations (épuisement sur 899,4 mg).

1re fraction de 100 cc : 81,2 méq. pour 100 g
2e fraction de 100 cc : 0,3 méq. pour 100 g.



Courbes 17. — *Désorption de NH_4 non échangeable*

La quantité désorbée par la chaleur était, pour le même échantillon, de 96,6 méq. Le passage à l'état non échangeable de l'ammonium est ici très net.

La courbe 17 représente la désorption de l'ammonium restant sur l'échantillon privé d'ammonium échangeable.

La quantité totale d'ammonium rétrogradé s'élève à 19,2 méq. pour 100 g d'argile.

On voit que la désorption ne commence qu'à des températures de l'ordre de 400°. L'ammonium rétrogradé se désorbe à des températures élevées.

En résumé, les déterminations faites sur l'échantillon ayant subi 10 dessiccations se présentent de la façon suivante :

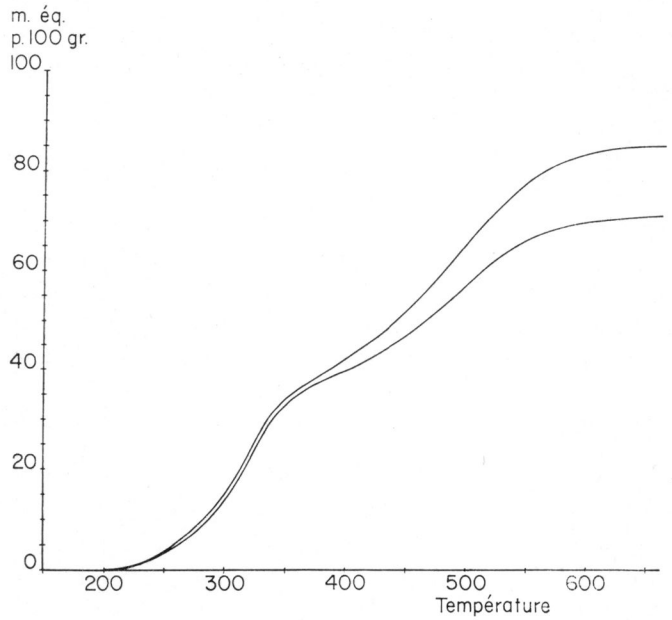
Désorption : 96,6 méq.

NH_4 échangeable	81,5
NH_4 rétrogradé (d'après la courbe de désorption)	19,2
Total	100,7

La différence (4 p. 100 de la quantité totale) entre les deux catégories de déterminations est de l'ordre de l'erreur expérimentale.

Montmorillonite K.

Le même traitement (alternances d'humidification et de dessiccation) a été réalisé sur une montmorillonite K.



COURBES 18. — *Influence des alternances d'humidification et de dessiccation d'une montmorillonite K sur la fixation et la désorption de* NH_4

L'échantillon a été ensuite saturé d'ammonium par traitements répétés à l'aide de $ClNH_4$, N, puis lavé à l'eau. Parallèlement, une montmorillonite K non séchée a été saturée d'ions NH_4 dans les mêmes conditions.

Les courbes 18 indiquent l'allure de la désorption dans les deux cas.

La quantité totale d'ions NH_4 fixés passe de 94,6 à 70,5 méq. Une partie des ions K, au cours des alternances d'humidification et de dessiccation est passée sous une forme non échangeable contre des ions NH_4. Il en résulte une diminution de la capacité d'échange de l'argile. C'est là une confirmation du fait bien connu de l'influence des alternances d'humidification et de dessiccation sur la rétrogradation du potassium.

Les courbes montrent également que la désorption des ions NH_4 est sensiblement identique jusqu'à des températures de 350°. Au-dessus les courbes divergent. En prenant en considération le point 400° la répartition des ions NH_4 se présente de la façon suivante :

Échantillons préparés à partir de montmorillonite K non séchée :

$<$	400°	46 méq.
$>$	400°	48,6 méq.

Échantillons préparés à partir de montmorillonite K séchée :

$<$	400°	41,5 méq.
$>$	400°	29,0 méq.

On constate que la rétrogradation du potassium a bloqué des positions d'échange désorbables à haute température. Comme il ne peut s'agir que de positions interfeuillets, on peut conclure que les ions NH_4 en position interfeuillets, même en l'absence de rétrogradation se désorbent à des températures plus élevées que ceux fixés sur les surfaces externes. Ce fait vient à l'appui de l'hypothèse formulée précédemment.

Influence de la dialyse

Des échantillons de montmorillonite NH_4 ont été placés dans des boudins de cellophane et dialysés contre de l'eau bipermutée, circulant de façon continuelle.

Le pH de l'eau bipermutée était sensiblement acide (5).

Les échantillons ont été recueillis après des temps variables allant de 9 à 72 jours.

Les courbes ci-aprés (courbes 19) représentent la désorption de NH_4 dans ces échantillons.

Sous l'influence de la dialyse, la montmorillonite s'est appauvrie en NH_4, la teneur passant de 100,6 méq. avant dialyse à 59,4 méq. après 72 jours.

On constate que la perte de NH_4 par dialyse ne se poursuit pas indéfiniment. Après 72 jours de dialyse la quantité restante de NH_4 est exactement la même qu'après 36 jours et la courbe de désorption de NH_4 restant est identique dans les deux cas.

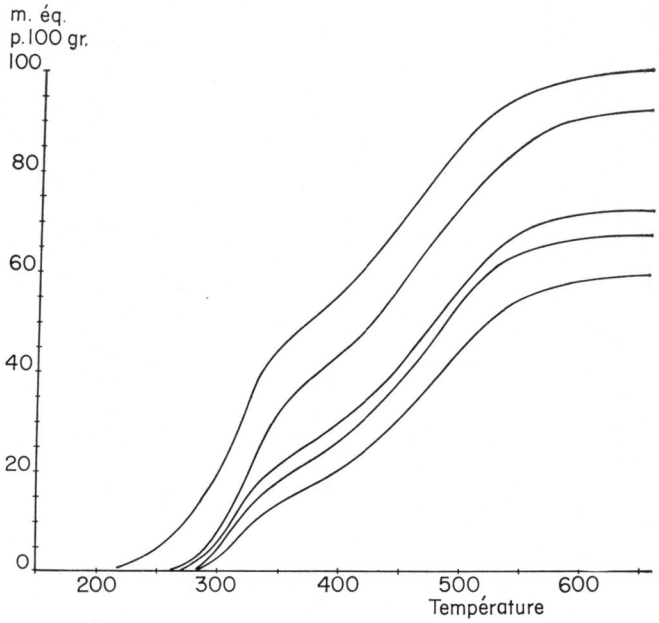
Cet arrêt de la dialyse s'explique par le fait que dans la suspension de la montmorillonite NH_4, il se produit un échange enre les ions H^+ de l'eau, et les ions NH_4^+ de la montmorillonite. Les ions NH_4 de la solution étant éliminés par dialyse, l'échange se poursuit jusqu'à établissement d'un équilibre entre la concentration en ions H^+ de part et d'autre de la membrane. Au cours de cette période le pH de la suspension baisse. Il passe de 6,96 à l'origine à 4,6 après 36 jours de dialyse.

Les courbes montrent que la perte d'ions NH_4 au cours de la dialyse porte principalement sur les ions NH_4 désorbables à basse température.

La répartition des ions NH_4 se présente de la façon suivante :

	< 400°	> 400°	Total
Non dialysée.....	50	50,6	100,6
Dialysée 9 jours.....	41	50,4	91,4
Dialysée 18 jours....	27	44,9	71,9
Dialysée 27 jours....	22,5	44,5	67
Dialysée 36 jours....	20	39,4	59,4

On constate ainsi une corrélation très nette entre deux techniques différentes



COURBES 19. — *Montmorillonite NH_4 dialysée pendant des temps variables*

de désorption. Les ions NH_4 les plus mobiles au cours de la dialyse sont également les plus mobiles lors de la désorption par la chaleur.

Cette corrélation tient à ce que, dans les deux cas, la mobilité des ions est liée à leur énergie de fixation.

Broyage des argiles

Au cours de recherches sur la mécanique chimique des cations échangeables (CHAMINADE et DROUINEAU, 1936) nous avons montré que le broyage énergique d'un sol provoquait un accroissement de sa capacité d'échange et faisait passer à l'état échangeable des quantités élevées de certains cations (le potassium échangeable pouvait passer de 10 à 400 mg de K_2O pour 100 g de sol).

Des recherches ont été réalisées sur l'effet du broyage sur le comportement de l'ion NH_4 au cours de la désorption par la chaleur.

Pour être efficace le broyage doit être très énergique. La technique utilisée a été la suivante :

Les échantillons secs d'argile sont placés dans un mortier d'agate muni d'un couvercle et renfermant des billes d'agate.

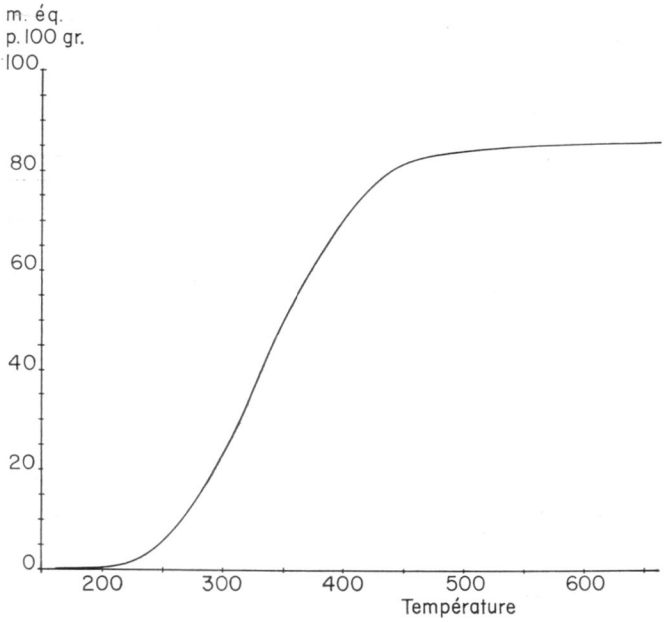
Le mortier est fixé sur un disque animé d'un mouvement de rotation rapide (450 tours /minute) l'axe du mortier étant excentré par rapport à celui du disque.

La durée du broyage a été de 1 heure pour tous les échantillons.

La courbe 20 montre l'allure de la désorption dans une montmorillonite NH_4 broyée.

On voit que le point d'inflexion 400° a totalement disparu.

Des essais identiques ont été réalisés sur des montmorillonites NH_4-K renfermant respectivement 46,3 et 27,4 méq. NH_4



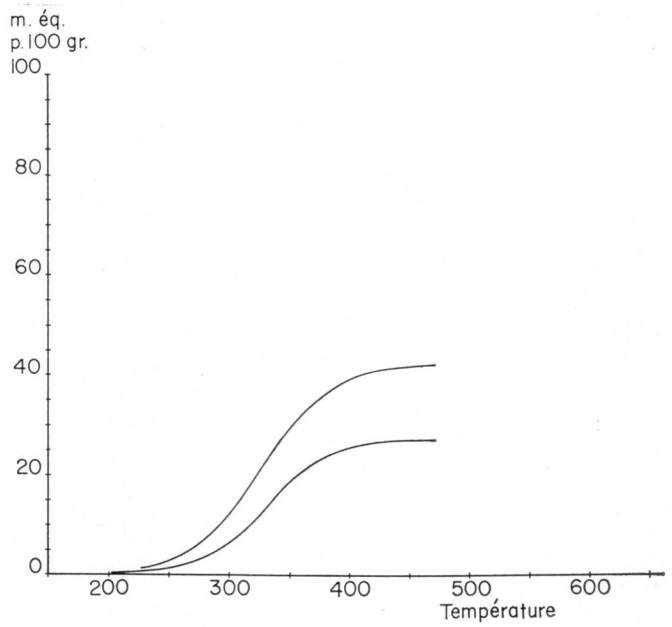
COURBES 20. — *Désorption de NH_4 dans une montmorillonite broyée*

La comparaison des courbes de désorption avant et après broyage montre le décalage considérable de la désorption vers les basses températures après broyage (courbes 21).

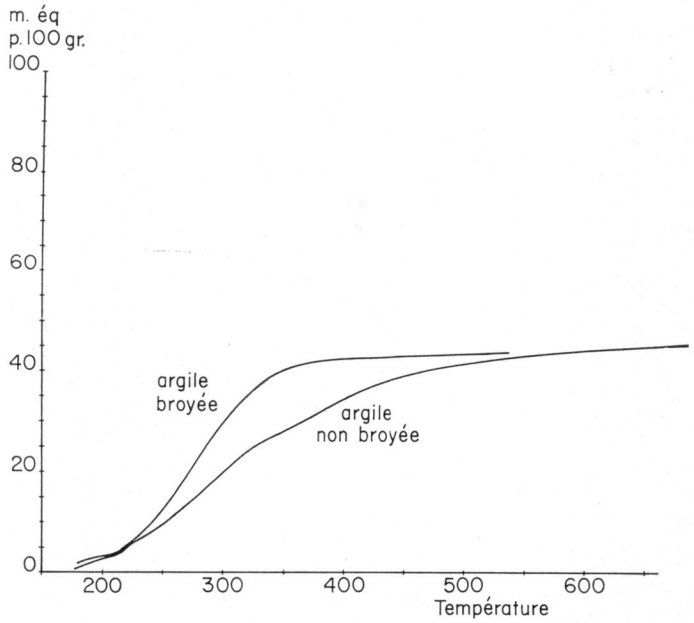
Les courbes 22 représentent l'action du broyage sur la désorption de l'ammonium dans une argile extraite d'un sol de limon. Le point d'inflexion 400° a disparu après broyage.

Saturation en NH_4 après broyage.

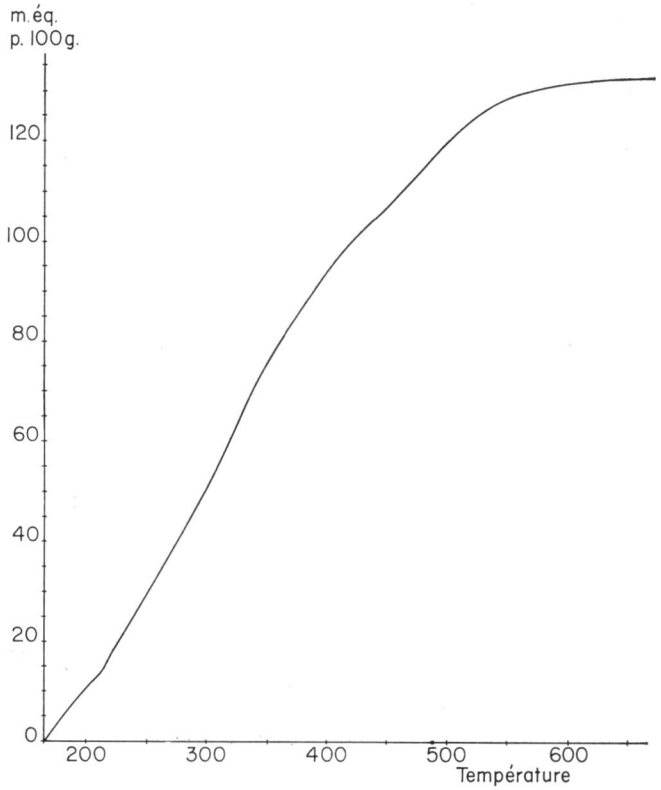
L'argile broyée a été saturée en NH_4 par des traitements répétés au chlorure d'ammonium.



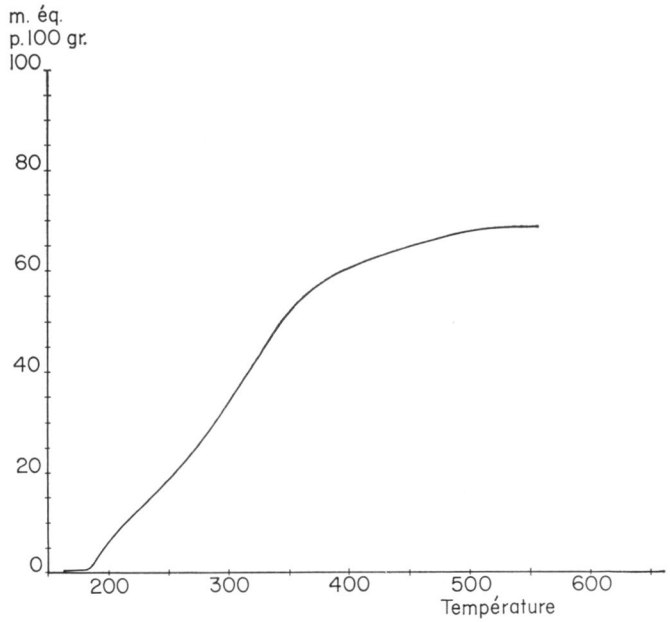
COURBES 21. — *Désorption de NH_4 dans des montmorillonites NH^4-K, broyées*



COURBES 22. — *Désorption de NH_4 dans une argile de limon broyée*



COURBE 23. — *Désorption de NH_4 dans une montmorillonite broyée et saturée en ions NH_4 après broyage*



COURBE 24. — *Désorption de NH_4 dans une illite broyée et saturée en ions NH_4 après broyage*

La courbe 23 montre l'allure de la désorption sur une montmorillonite. Le broyage a fait passer la capacité de fixation de la montmorillonite de 100 à 130,5 méq.

Dans le cas de l'illite fermée dont la capacité d'échange initiale était de 18 méq. (courbe 5) le broyage a eu un effet beaucoup plus marqué en amenant la capacité d'échange à 67,6 méq. (courbe 24).

Dans tous les cas les courbes de désorption après broyage ne présentent qu'un seul S ; tout se passe comme si le mode de fixation des ions NH_4 était identique pour tous les ions présents dans le système.

On peut émettre l'hypothése suivante quant à l'action du broyage :

1° Destruction partielle du réseau cristallin et transformation des liaisons internes en liaisons externes.

2° Apparition par rupture des cristaux de sites d'échange nouveaux et augmentation de la capacité d'échange.

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce mémoire un certain nombre de résultats expérimentaux relatifs à la désorption par la chaleur des ions NH_4 fixés par les argiles. En fait, il s'agit là d'une technique d'étude des argiles dont les possibilités dépassent largement le cadre de ce premier mémoire.

Des recherches ultérieures auront pour objet l'examen du parti qu'on peut tirer de cette technique, notamment dans l'étude des phénomènes de rétrogradation de l'ion NH_4 et de l'influence du broyage sur les propriétés de l'argile.

Reçu pour publication en novembre 1965

SUMMARY

STUDY ON THE DESORPTION, IN FUNCTION OF THE TEMPERATURE OF THE AMMONIUM ION FIXED BY CLAYS

A technique is described, which allows to record the release of Ammonia by clays containing exchangeable Ammonium, in function of the temperature (200 to 650°).

The desorption curve fo the Ammonium in an NH_4 montmorillonite has the shape of a double S with three points of inflexion. It shows the presence, in the clay, of two modes of fixation of the Ammonium-ion, which have different desorption temperatures.

The behaviour of the desorption depends on the nature of the clay ; the curves have been established for a montmorillonite, an illite, a vermiculite and a clay extracted from a loamy soil.

The desorption of Ammonium has been studied on NH_4-Ca, NH_4-Mg, NH_4-K and NH_4-Na montmorillonites with varying NH_4 contents, which came either from NH_4 Montmorillonites that had been treated with the chlorids of the preceding cations or from Ca, Mg, K, Na Montmorillonites that had been treated with ammonium chlorid.

Whatever the nature of the fixed cations may be, the NH_4 ions are the first to be fixed on the desorbable positions at a high temperature.

The Ca, Mg, Na ions displace first of all the desorbable NH_4 ions at a low temperature. The K ion has a special behaviour ; it displaces in priority the NH_4 ions, desorbable at a high temperature.

An alternating humidification and dessiccation of a K montmorillonite blocks the exchange positions which then become inaccessible to NH_4 ions during the subsequent treatment of montmorillonite by ammonium chlorid (fixing of K). The study of the desorption curves shows that the exchange positions thus blocked correspond to the NH_4 ions desorbable at a high temperature.

The dialysis of a NH_4 montmorillonite against twice permuted water, causes its impoverishment in exchangeable ammonium. The loss of NH_4 ions through dialysis first involves the ions desorbable at a low temperature. There is a parallelism between the NH_4 ionic mobility during the dialysis and the desorption by heat.

An energetic crushing of the clays alters the desorption curve of the NH_4 ions by the heat. The desorption of the NH_4 ions moves over towards the lower temperatures. On the other hand, in crushed clay, the desorption curve only shows one point of inflexion. It looks as though the grinding had unified the energy of activation of all the NH_4 ions in the system.

After the grinding, the fixation capacity increases, either because of the creation of new exchange valencies or by the liberation of interlayer valencies, which were not accessible before the grinding.

ZUSAMMENFASSUNG

UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE DESORPTION, IN ABHÄNGIGKEIT DER TEMPERATUR, DES DURCH TONE GEBUNDENEN AMMONIUM-IONS

Es wird eine Technik beschrieben, die das Aufzeichnen der Entwicklung von Ammonium durch Tone, die austauschbares Ammonium enthalten, erlaubt, in Abhängigkeit der Temperatur (200 bis 650°).

Die Desorptionskurve des Ammoniums in einer NH_4-Montmorillonite hat die Form eines Doppel-S mit drei Biegungspunkten. Sie zeigt das Vorhandensein im Ton von zwei Bindungsarten für das Ammonium-Ion deren Desorptionstemperaturen verschieden sind.

Der Verlauf des Desorption wird durch die Art der Tone bestimmt ; die Kurven wurden für eine Montmorillonite, eine Illite, eine Vermikulite und einen aus Lehmboden extrahierten Ton aufgestellt.

Die Desorption des Ammoniums wurde auf NH_4-Ca-, NH_4-Mg-, NH_4-K-, und NH_4-Na-Montmorilloniten mit unterschiedlichen Gehalt and NH_4 untersucht, die entweder von NH_4-Montmorilloniten stammen, die durch die Chloride der vorhergehenden Kationen behandelt wurden, oder von Ca, Mg-K-, Na-Montmorilloniten, die durch Ammoniumchlorid behandelt wurden.

Welches auch die Art der gebundenen Kationen sei, werden sie vorzugsweise auf desorbierbare Positionen bei hoher Temperatur festgelegt.

Die Ca-, Mg-, Na-Ionen verdrängen vor allem die desorbierbaren NH_4-Ionen bei niedriger Temperatur. Das K-Ion benimmt sich etwas eigenartiges verdrängt vorzugsweise die bei niedriger Temperatur desorbierbaren NH_4-Ionen.

Wechsel von Durchfeuchtung und Trocknung einer K-Montmorillonite blockieren die Austauschpositionen, die für die NH_4-Ionen bei weiterer Behandlung der Montmorillonite durch Ammoniumchlorid (Festlegung des K) unerreichbar werden. Die Prüfung der Desorptioskurven zeigt, dass die so blockierten Austauschpositionen den bei hoher Temperatur desorbierbaren NH_4-Ionen entsprechen.

Die Dialyse einer NH_4-Montmorillonite gegen doppelt permutiertes Wasser erzeugt seine Verarmung an austauschbarem Ammonium. Der Verlust von NH_4-Ionen durch Dialyse betrifft zuerst die bei niedriger Temperatur desorbierbaren Ionen. Es gibt ein Parallelismus zwischen der Beweglichkeit der NH_4-Ionen während der Dialyse und der Desorption durch Hitze.

Das energische Zermahlen der Tone verändert die Desorption der NH_4-Ionen durch Hitze ; die Desorption der NH_4-Ionen verlagert sich in Richtung der tieferen Temperaturen. Andrerseits hat die Desorptionskurve im gemahlenen Ton nur noch eine Biegung. Es ist als ob das Mahlen die Aktivationsenergie aller im System vorhandenen NH_4-Ionen vereinheitlicht hätte.

Nach dem Mahlen nimmt das Bindungsvermögen zu, sei infolge neu entstehender Austauschwertigkeiten, sei durch Freiwerden der Zwischenschichtwertigkeiten, die vor dem Mahlen nicht zugänglich waren.

Изучение десорбции в зависимости от температуры иона аммония закрепленного глинами.

Р. ШАМИНАД

РЕЗЮМЕ

Автор описывает технический прием регистрации аммониака выделяемого глинами содержащими обменный аммоний, в зависимости от температуры (200°-650°). Кривая десорбции аммония в монмориллоните NH_4 принимает форму S с тремя точками отклонения. Кривая эта указывает на существование в глине двух путей закрепления иона аммония, температура десорбции которых различна.

Ход десорбции зависит от природы глины; приведенные кривые получены при помощи монмориллонита, вермикулита, иллита и глины экстрагированной из почвы суглинка.

Десорбция аммония была изучена на монмориллонитах NH_4-Ca, NH_4-Mg, NH_4-K, NH_4-Na с различным содержанием NH_4 и приготовленных, или при помощи монмориллонитов NH_4 обработанных хлорнокислыми солями указанных катионов, или-же монмориллонитов Ca, Mg, K и Na обработанных солянокислым аммонием.

Какова-бы ни была природа закрепленных катионов, ионы NH_4 закрепляются в первую очередь — в состоянии готовности к десорбции при высоких температурах. Ионы-же Ca, Mg, и Na перемещают в первую очередь ионы NH_4 готовые к десорбции при низких температурах. Что-же касается иона K, то его поведение особо : он перемещает в первую очередь ионы NH_4 десорбируемые при высоких температурах.

Попеременные увлажнение и сушка монмориллонита K вызывают блокировку обменных позиций, становящихся недоступными для ионов NH_4 при последующей обработке монмориллонита солянокислым аммонием (регрессия калия). Изучение кривых десорбции показывает что блокированные таким образом обменные позиции соответствуют ионам NH_4 десорбируемым при высоких температурах.

Диализ монмориллонита NH_4 в бидистиллированной воде вызывает его обеднение в обменном аммонии. Потерю ионов NH_4 при диализе составляют прежде всего ионы десорбируемые при низких температурах. Наблюдается параллелизм между подвижностью ионов NH_4 при диализе и тепловой десорбцией.

Энергичное размельчение глин изменяет кривую тепловой десорбции иона NH_4.

В этом случае десорбция ионов NH_4 перемещается по направлению к более низким температурам. С другой стороны, на кривой десорбции размельченных глин остается только один пункт отклонения. Все происходит так, как если-бы, размельчение об'единяло энергию активации всех ионов NH_4 присутствующих в системе.

Размельчение увеличивает силу заекрепления, или с помощью создания новых валентностей обмена, или — освобождения межпластовых валентностей недоступных до применения этого приема.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAMINADE R., DROUINEAU G., 1936. Recherches sur la mécanique chimique des cations échangeables. *Ann. agron.*, 677-681.

CHAMINADE R., 1962. Désorption par la chaleur de l'ion ammonium fixé par les argiles. *C. R. Acad. Sci.*, **254**, 902-904.

CHAMINADE R., 1964. Désorption par la chaleur de l'ion ammonium fixé par les argiles. *VIIIe Congr. Intern. Sci. Sol, Bucarest* (à paraître).

Ann. agron., 1965, **16** (6), 663-700.

PREMIERS RÉSULTATS D'UN ESSAI D'ENTRETIEN DU SOL EN ARBORICULTURE FRUITIÈRE

I. — Action sur les propriétés physiques du sol

R. GRAS

avec la collaboration technique de J. Oudard

Laboratoire des Sols,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Yvelines)

SOMMAIRE

Quatre modes d'entretien du sol sont comparés dans un verger établi sur un sol de limon : désherbage total, engazonnement permanent, engrais vert d'hiver, sol nu travaillé. Les résultats des premières années font apparaître entre traitements des différences pour la matière organique et les propriétés physiques. L'engazonnement provoque une augmentation de la quantité de matières organiques et une amélioration sensible de la stabilité structurale ; la perméabilité, à peu près identique à celle du sol nu en été, lui est supérieure pendant l'hiver. L'enfouissement de l'engrais vert a pour conséquence une amélioration temporaire de la stabilité et de la perméabilité. Le désherbage total amène une diminution de la perméabilité et de la stabilité structurale.

INTRODUCTION

En verger, l'objectif de l'entretien du sol est d'assurer un bon fonctionnement des racines et de mettre à leur disposition en quantité suffisante l'eau et les éléments nutritifs. Le terme *mode d'entretien* désigne plus particulièrement la technique employée vis-à-vis du sol examiné du point de vue de ses propriétés physiques : le sol nu travaillé, la couverture de paille, l'enherbement sont des exemples de mode d'entretien.

Certains modes d'entretien peuvent être considérés comme simples, puisqu'ils mettent en œuvre tout au long de l'année la même technique (enherbement permanent). On qualifie de complexes les modes d'entretien qui juxtaposent dans l'espace ou le temps des techniques différentes (engrais vert d'hiver : succession dans un cycle

annuel de végétation temporaire et de travail du sol). Le nombre des modes d'entretien simples ou complexes utilisés ou utilisables est considérable et on connaît mal leurs actions sur la production fruitière.

S'il n'est pas question de faire une étude exhaustive des modes d'entretien, du moins peut-on se limiter à certains qui sont particulièrement typiques pour tenter de déterminer le mécanisme de leur action éventuelle sur la production. L'essai dont nous examinons ici les premiers résultats compare à la technique traditionnelle du sol nu travaillé avec enherbement spontané d'hiver les traitements suivants :

— des modes d'entretien simples comportant des caractéristiques extrêmes : sol nu désherbé (absence totale de végétation et de travail du sol) et engazonnement (absence de travail du sol et végétation permanente) ;

— un mode d'entretien complexe fréquemment utilisé (sol nu travaillé plus engrais vert d'hiver).

Cet essai a été réalisé en collaboration avec divers laboratoires de l'I. N. R. A. : Laboratoire de recherches sur les mauvaises herbes (M. SCHMITLIN), Station centrale d'Agronomie (M. TROCMÉ) et avec les Services agricoles de la Seine-et-Marne, M. BOULAY étant alors ingénieur à ce service.

MÉTHODES EXPÉRIMENTALES ET CONTROLE DE L'ESSAI

1° *Conception théorique d'un essai sur le mode d'entretien du sol*

L'expérimentation sur les modes d'entretien du sol en arboriculture pose, au point de vue méthodologique, des problèmes particuliers selon les objectifs poursuivis :

La simple étude des modifications des propriétés physiques du sol ne présente pas de difficultés particulières du point de vue strictement expérimental. L'installation de l'essai dans un verger est cependant souhaitable pour tenir compte de l'action possible de la circulation des appareils de traitement antiparasitaire ou de tranport.

Juger de l'influence de divers modes d'entretien sur le rendement pose des problèmes beaucoup plus ardus. L'action d'une technique donnée dépend de ses modalités de mise en œuvre ; par exemple du fait de la concurrence entre l'herbe et l'arbre, l'action d'un enherbement sur les rendements sera très différente suivant les doses d'azote apportées. D'un point de vue pratique, il faut mettre en œuvre chaque mode d'entretien avec ses conditions optimum de fertilisation et d'alimentation en eau. Comme en général ces conditions ne sont pas connues, il est nécessaire de les déterminer au préalable ou de les introduire comme variable dans l'essai mode d'entretien.

Ceci conduit à la réalisation d'un essai plurifactoriel avec des niveaux de fumure et d'apports d'eau couvrant la gamme des optimums de tous les modes d'entretien étudiés. Un tel essai permet de déterminer quelle est la combinaison mode d'entretien-fumure-irrigation donnant le meilleur rendement. Il ne faut pas se dissimuler les difficultés de réalisation d'un tel essai et les problèmes posés par la juxtaposition de parcelles de propriétés physiques différentes, par exemple les parcelles portant un traitement améliorant la perméabilité peuvent recevoir l'eau de ruissellement des parcelles contiguës moins perméables. Lorsque l'évapotranspiration est modifiée par un traitement (engazonnement) les parcelles expérimentales sont trop petites pour que l'évapotranspiration n'y soit pas influencée par les parcelles voisines (R. J. BOUCHET, 1964). Par ailleurs, du fait que l'expérimentation porte sur des plantes pérennes, apparaissent des difficultés telles que celles-ci : récolte de l'année dépendant en partie des conditions de l'année précédente, rémanence des conséquences d'un effet dépressif après que sa cause ait cessé (diamètre du tronc restant inférieur à celui du témoin de nombreuses années après le moment où l'effet dépressif est intervenu).

Comprendre le mécanisme de l'action d'un mode d'entretien sur le rendement est une nécessité, tant du point de vue scientifique que technique. En effet le nombre de tels essais est forcément limité et leurs résultats ne peuvent être transposés tels quels dans des milieux même peu différents. Si la comparaison des rendements d'un essai plurifactoriel fournit des éléments pour la compréhension des mécanismes mis en jeu, elle est cependant insuffisante. Les modes d'entretien peuvent intervenir indirectement sur l'arbre, par exemple à la suite de la modification des conditions de

nutrition, en dehors même de tout phénomène de concurrence : par rapport au sol nu travaillé, amélioration de la nutrition potassique par le mulch (TROCMÉ, 1957) et phosphatée par l'absence de travail (E. G. PROEBSTING, 1955). On conçoit alors la nécessité de contrôler l'intervention des modes d'entretien dans divers domaines, par exemple, pour la nutrition, analyse de feuilles.

En définitive, l'interprétation correcte des résultats d'un essai de mode d'entretien du sol de verger nécessite :

— l'adoption d'un dispositif expérimental plurifactoriel mettant en comparaison simultanément les modes d'entretien et leurs conditions de mise en œuvre (fertilisation, irrigation).

— la réalisation, outre le contrôle des rendements, de mesures sur les propriétés du sol, les conditions de nutrition des arbres et leur alimentation en eau.

On pourra ainsi, à défaut d'une explication rigoureuse, s'ouvrir la voie vers une interprétation plus approfondie des phénomènes constatés.

2° *Dispositif expérimental et traitements*

Pour des raisons évidentes de mise en place dans un verger commercial, le dispositif ne répond que très imparfaitement aux conditions théoriques idéales précédemment définies. Il comporte seulement deux séries de traitements (mode d'entretien et fumure azotée) combinées dans un dispositif factoriel à parcelles subdivisées (*split plot*).

— Les grandes parcelles, (4 répétitions), comportant 8 arbres en essai, portent les modes d'entretien :

• sol nu travaillé, avec enherbement spontané d'hiver, considéré comme témoin (T). Le sol est travaillé entre le 1er avril et le 30 octobre à une profondeur de 10-12 cm avec un pulvériseur à disques ou un cultivateur ;

• sol nu travaillé avec engrais vert d'hiver (V) ray-grass d'Italie semé en août-septembre et enfoui le 1er avril. Le nombre de passages des outils est un peu plus faible compte tenu de la date du semis ;

• sol nu desherbé (D). Absence totale de végétation obtenue par l'emploi d'herbicides rémanents ;

• engazonnement (G). L'alimentation en eau étant déficiente en moyenne une année sur deux, on a choisi des plantes peu vigoureuses (mélange de paturin et de trèfle blanc), fauchées à 3-4 cm chaque fois qu'elles atteignent 10 cm de haut. Herbe laissée sur place ;

— les petites parcelles, (4 arbres) résultant de la division en deux des parcelles précédentes, portent une dose simple et une dose double d'azote ;

— on n'a pas fait intervenir l'alimentation en eau en tant que traitement. La sécheresse de chaque année est caractérisée par un bilan moyen d'eau effectué à l'aide de la formule de L. TURC (1961).

Cet essai permet de recueillir des indications sur :

— les modifications des propriétés physiques du sol par les modes d'entretien ;

— l'influence des modes d'entretien sur la nutrition en effectuant des analyses de feuilles ;

— l'incidence du déficit en eau de chaque année sur les rendements dans les divers traitements, si la nutrition y est satisfaisante.

3° *Déroulement de l'essai et conditions climatiques*

A) — *Déroulement.*

a) *1963* :

— gazon : semis 8-4 ; 5 fauches à motofaucheuse = 27-5 — 6-6 — 20-6 — 8-7 — 29-7 ;

— désherbant : le dernier travail du sol a été effectué le 25-10-1962 et la première application d'herbicide faite le 18-3-1963 : atrazine à 5 kg/ha de matière active (1) ;

— sol nu travaillé : 9 passages d'outil : pulvériseur à disques (D) ou cultivateur (C) — dans interligne : 18-5 (D) — 29-5 (D) — 18-6 (D) — 24-7 (D) — 26-7 (C) — 17-8 (D) — 15-10 (D) — 28-10 (D).

Travail sur ligne 8-5 et 22-10.

— Engrais vert : semis le 31-10-62 suivi d'aucune levée du fait des grands froids. Même travail que le sol nu travaillé jusqu'au 17-8 inclus.

Semis le 2-9.

(1) Par la suite, destruction au cours de l'année des plantes résistantes avec de l'aminotriazole à 5 p. 1 000 et du 2-4-D à 1 p. 1 000.

b) *1964* :

— gazon : 7 fauches à moto-tondeuse : 16-4 — 27-4 — 8-5 — 19-5 — 3-6 — 19-6 — 29-6 ;
— desherbant : application d'atrazine à 3 kg/ha de matière active le 14-2 ;
— sol nu travaillé : 7 passages d'outil dans interligne : 10-4 (D) — 12-5 (D) — 30-5 (D) — 4-6 (C) — 29-6 (C) — 21-9 (C) — 17-11 (D).
Travail sur ligne : 22-4 — 14-7.
— Engrais vert : retournement le 10-4 (3 passages disques) — même travail que sol nu jusqu'au 21-9 inclus.
Passage moto-houe 22-9 et semis.

B) *Conditions climatiques* : Capacité de réserve du sol : 180 mm.

a) *1963* :

Mois	Température moyenne (°C)	Évapotranspiration potentielle (mm)	Pluviométrie (mm)	État des réserves (mm)	Eau à apporter (mm) pour que la réserve ne soit jamais nulle
Janvier.....	— 2,8	0	12	180	0
Février.....	— 2,4	0	20	180	0
Mars.....	5,2	29	83	180	0
Avril.....	9,3	54	29	155	0
Mai.....	16,5	92	57	120	0
Juin.....	16,1	95	120	145	0
Juillet.....	17,9	124	60	81	0
Août.....	15,0	71	105	115	0
Septembre....	15,1	60	18	73	0
Octobre.....	10,2	32	19	60	0
Novembre....	9,2	19	122	163	0
Décembre.....	0,9	3	5	165	0
		579	650		0

b) *1964* :

Mois	Température moyenne (°C)	Évapotranspiration potentielle (mm)	Pluviométrie (mm)	État des réserves (mm)	Eau à apporter (mm) pour que la réserve ne soit jamais nulle
Janvier.....	0,0	0	34	180	
Février.....	5,7	17	48	180	
Mars.....	5,5	26	65	180	
Avril.....	9,6	58	72	180	
Mai.....	14,0	96	32	116	
Juin.....	16,1	119	44	41	
Juillet.....	19,1	125	28	0	56
Août.....	17,9	96	13	0	83
Septembre....	16,3	81	55	0	26
Octobre.....	8,8	31	37	6	
Novembre....	6,8	15	63	54	
Décembre.....	1,9	5	41	90	
		669	491		165

4° *Interprétation statistique*

Cet essai implanté en vue de tester les effets du facteur « mode d'entretien » avec 4 modalités, comporte pour ce facteur 3 degrés de liberté. Ceux-ci permettent d'effectuer 3 comparaisons orthogonales entre elles. Le choix entre les différentes décompositions possibles permet de tester des hypothèses relatives aux modalités d'action des modes d'entretien. Nous en avons retenu trois :

— Tout d'abord, comme les modes d'entretien font intervenir isolément ou en combinaison *le travail du sol* et une *végétation installée*, on essaie d'expliquer leurs actions par l'addition de l'effet du travail du sol et de celui de la végétation installée, agissant indépendamment. On a ainsi le groupe de comparaison :

- effet du travail du sol : gazon — sol nu desherbé *versus* témoin — engrais vert ;
- effet de la végétation installée : gazon — engrais vert *versus* témoin — sol nu desherbé ;
- interaction travail végétation installée.

Lorsque cette interaction est significative, ce qui traduit la non additivité du travail du sol et de la végétation installée, la décomposition précédente est rejettée.

— On peut ensuite tester successivement 3 comparaisons : la première utilise comme critère l'*absence absolue de végétation* : qui sépare le sol nu desherbé du groupe gazon — engrais vert — témoin (avec enherbement spontané d'hiver). Le caractère spontané ou installé de la végétation permet de séparer le témoin du groupe gazon — engrais vert. Enfin dans le groupe végétation installé, la permanence de la végétation permet de séparer le gazon de l'engrais vert.

Une variante du groupe précédent est obtenue en modifiant les deux dernières comparaisons :

- permanence de la végétation : gazon *versus*, engrais vert — témoin ;
- caractère spontané ou installé de la végétation temporaire : témoin *versus*, engrais vert.

Chaque comparaison subdivisant l'ensemble mode d'entretien en sous-ensembles de plus en plus homogènes, un groupe de comparaison est logique lorsque les seuils de signification augmentent quand on passe de la première à la dernière comparaison, la première comparaison pouvant être seule significative.

— Le gazon étant connu pour avoir dans certains cas une action particulière, tenant en partie au fait que la végétation installée est permanente, on oppose son action à celle des autres traitements :

- gazon *versus* engrais vert — témoin — sol nu desherbé ;
- sol nu desherbé *versus* engrais vert — témoin ;
- engrais vert *versus* témoin.

Pour des facilités d'expression nous désignerons les comparaisons précédentes par « groupe *végétation permanente* ».

Ce groupe sera considéré comme satisfaisant si les seuils de signification s'élèvent lorsqu'on passe de la première à la dernière comparaison.

Pour les différents résultats expérimentaux, on choisit le groupe de comparaison le meilleur ; ainsi :

— élimination du groupe travail végétation artificielle si l'interaction travail végétation est significative (non additivité des actions du travail et de la végétation) ;

— pour les autres groupes, élimination lorsque les seuils de signification ne croissent pas régulièrement lorsqu'on passe de la première à la dernière comparaison.

Cette façon de procéder n'a pas un caractère absolu, notamment parce que les modes d'entretien ont une action complexe ; elle nous a cependant permis de choisir sans ambiguïté un groupe de comparaisons pour tous les facteurs étudiés dans ce mémoire, ce qui justifie *a posteriori* son emploi.

Lorsque plusieurs facteurs sont mis simultanément en jeu, on examine d'abord la signification de l'interaction. Si elle n'est pas significative, l'effet *principal ou moyen* représente l'action propre du traitement. Lorsque l'interaction est significative l'effet principal, moyennes d'effets disparates, perd de son intérêt. Il faut alors considérer les effets d'un facteur à un niveau donné de l'autre facteur.

5° *Sol, localisation, matériel végétal*

L'essai est installé en Seine-et-Marne entre Nangis et Provins sur un sol qui comporte un horizon limoneux épais d'une quarantaine de centimètres reposant sur un horizon limono-argileux. La structure de l'horizon superficiel est continue à fragmentaire avec une tendance phylliteuse en surface.

L'horizon sous-jacent a une structure continue à faiblement polyédrique ; il présente des taches de rouille nombreuses et quelquefois des concrétions. La stabilité structurale est médiocre pour tous les horizons. Les caractéristiques du sol avant essai sont reproduites dans le tableau 1.

TABLEAU I

Profondeur (cm)	Granulométrie (μ)					Mat. org.	pH eau	Stabilité structurale		Capacité au champ (%)	Point de flétrissement (%)
	0-2	2-20	20-50	50-200	200-2 000			log. 10 I_s	log. 10 K		
0-10	17,35	33,05	46,50	3,33	1,60	1,75	7,3	2,37	1,23	23,7	6,1
65	30,20	32,90	32,75	3,25	0,60	0,30	7,2	2,08	1,21	23,6	11,2
85	33,20	28,90	33,95	3,25	0,45	0,25	6,6	2,22	1,00	23,5	12,3

En surface 25 p. 100 de la matière organique est sous forme libre et 75 p. 100 sous forme liée à la matière minérale. La capacité de réserve en eau sur l'épaisseur de 80 cm exploitée par les racines est de 180 mm environ.

Dans la région, le déficit moyen de la pluviométrie sur l'évapotranspiration est dans la classe 150-200 mm d'après la carte de L. TURC et Th. GOBILLOT (1960). Une étude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation (DARVES BORNOZ et *al.*, 1964) indique pour Coulommiers, station la plus voisine, un besoin annuel de 165 mm une année sur deux avec une capacité de réserve du sol de 150 mm.

Les arbres sont des pommiers *Reinette du Canada* greffés sur paradis, plantés à la distance de 3 m sur la ligne et de 4 m entre les lignes. Ils ont été plantés en novembre 1958 et conduits en haie fruitière. Ils avaient donc un peu plus de 4 ans de plantation au printemps 1963, lorsque l'essai d'entretien a été installé.

6° *Étude des propriétés physiques et de la teneur en matière organique du sol*

L'observation du sol est essentielle pour l'étude de l'action des traitements sur la structure et l'installation des racines des arbres. Elle est un préalable à l'exécution de certaines mesures en permettant de délimiter dans l'interligne des zones créées par le passage des roues, l'effet protecteur des arbres sur le sol, etc. Lorsque les traitements produisent des variations verticales de structure (croûte de battance en zone désherbée) l'examen permet, soit de choisir des zones homogènes, soit de savoir quelle interprétation il faut donner à la mesure.

Les analyses et mesures :

— matière organique, dosage par la méthode P. ANNE (1945) du carbone total ou de celui des fractions libres et liées séparées par la méthode G. MONNIER, L. TURC et *al.* (1962) ;

— stabilité structurale, indice log 10 I_s de S. HÉNIN, G. MONNIER et *al.* (1958) obtenu par tamisage sous l'eau après divers prétraitements ;

— densité apparente, méthode du cylindre ;

— degré de perméabilité, méthode de Muntz pratiquée avec un cylindre de 1 dm^2 de section enfoncé de 6 cm dans le sol, dans lequel on maintient un plan d'eau de 3 cm au-dessus du niveau du sol.

L'infiltration de l'eau s'effectuant par les fissures du sol (fentes de gel, dessiccation, espaces entre les mottes) et les canalicules de la masse de sol, on distingue la « perméabilité de fissure » et la « perméabilité de masse ». Lorsque la perméabilité de fissure est par trop importante, la quantité d'eau infiltrée est très grande et il est pratiquement impossible d'effectuer des mesures, c'est notamment le cas juste après un travail du sol. Ainsi on ne peut faire des mesures dans les parcelles travaillées que si le sol s'est « rassis » sous l'action des précipitations. Dans le cas contraire on se borne à constater que la perméabilité globale des parcelles travaillées est supérieure à celle des autres traitements et on effectue les mesures seulement dans les parcelles non travaillées (gazon, désherbant).

L'ensemble de ces considérations est surtout valable pour la couche superficielle.

7° *Nutrition, production de fruits et croissance des arbres*

— Analyse de sol : P, K. } Mémoire
— Analyses de feuille. } II
— Mesure du rendement par parcelle et du poids moyen des fruits sur un échantillon. } Mémoire
— Mesure de la longueur de la circonférence du tronc au moment du repos végétatif. } III

RÉSULTATS

Observations des profils culturaux

Les examens de profil ont été effectués à différentes époques de l'année dans la couche superficielle.

A — *Printemps 1964*

Avant le travail du témoin et de l'engrais vert.

Témoin.

0-15 cm. La surface du sol présente un réseau de fissures peu accentuées. Structure fragmentaire polyédrique peu nette, parfois de grosses mottes compactes provenant d'un travail précédent. Sol humide, sans trace d'eau libre.

15-18 cm. Structure phylliteuse sur les quelques millimètres au sommet de la couche. En dessous, structure continue.

Le sol est déprimé sous le passage des roues.

Engrais vert.

Le ray-grass d'Italie a été semé le 2 septembre 1963 après passage d'un cover crop et ratissage.

0-15 cm. Structure fragmentaire polyédrique beaucoup moins nette que dans le témoin. Sol beaucoup plus humide que dans les autres traitements, surtout les 8 cm superficiels. Les racines de ray-grass exploitent cette zone en s'y ramifiant assez peu ce qui est l'indice d'un milieu peu favorable.

15 cm. Limite du travail du sol. On distingue rarement un lissage.

Le sol est déprimé sous le passage des roues.

Gazon.

Il a été semé le 9 avril 1963, après passage du canadien et de la moto-houe et s'est installé rapidement. La structure est continue à fragmentaire en surface et moins bonne que pour le témoin. Les racines de pâturin sont peu nombreuses, mais bien ramifiées. Des nodosités sont visibles sur les racines de trèfle. L'enracinement des deux plantes est très superficiel.

Le passage de roues se marque par un enfoncement du sol.

Désherbant.

Il n'y a eu aucun travail du sol depuis la fin octobre 1962 et la première application d'herbicide a été faite fin mars 1963. L'examen de la surface fait appa-

raître trois zones : une zone sous le passage des roues plus déprimée que dans les autres traitements, une zone entre les roues, une zone sous les arbres légèrement plus élevée que les autres.

. Sous passage des roues : structure phylliteuse nette, sol compact, glacé en surface.

. Entre le passage des roues : 0-1 cm croûte de battance se terminant parfois à la base par une zone à structure « mie de pain ».

1-14 cm : structure à tendance phylliteuse, mais avec nombreux pores apparents.

14 cm : fond de l'ancien labour.

. Partie sous les arbres : important réseau de fissures (1 cm de large) atteignant au moins 10 à 12 cm de profondeur. Le sol étant très humide au moment de l'observation, le gel de l'hiver semble à l'origine de ces fissures et non le retrait du sol consécutif à un dessèchement.

0-0,5 : couche glacée ;

0,5 ... 14 cm : sol meuble, de structure continue (absence de fissures), mais avec une bonne porosité mottière. Cette zone a la structure la meilleure de la parcelle désherbée. Ceci est certainement provoqué par l'absence de tassement (passage d'hommes et d'instruments) et un meilleur écoulement de l'eau superficielle dû au surplomb et peut-être à un effet protecteur du feuillage contre les orages d'été.

Comme on a dû préparer de la terre fine pour l'installation du gazon et de l'engrais vert, la structure sous ces traitements est restée défectueuse, certainemeent à cause d'une prise en masse plus accentuée.

B — *Été 1964*

Témoin et engrais vert.

Structure fragmentaire à éléments de dimension moyenne dans la couche travaillée.

Gazon.

La structure ne présente pas de modification par rapport à l'observation du printemps. Le sol est très sec en surface sur 5 à 10 cm. On trouve parfois des radicelles d'arbres à 4,5 cm de la surface du sol.

Désherbant.

Les modifications concernent essentiellement l'apparition de fentes de retrait dans la partie centrale de l'interligne et un certain colmatage des fentes existant sous les arbres à la sortie de l'hiver. A l'exception des 2 ou 3 premiers centimètres, le sol est plus humide que sous tous les autres traitements. On trouve quelques radicelles de pommiers à 2,5 cm de la surface et il est fréquent d'en trouver à 4 et 5 cm.

2° Examen de la répartition des radicelles de pommiers dans la couche 0-25 cm (été 1965) (fig. 1)

On a examiné des tranchées perpendiculaires à la ligne d'arbres, profondes de 30 cm et longues de 2 m. Ces tranchées qui s'étendaient de la ligne d'arbres au centre de l'interligne ont été creusées sur les bordures des parcelles en nombre égal dans les doses simples et doubles d'azote.

La quasi-totalité des radicelles avaient moins de 1 mm de diamètre ; on a rarement trouvé de racines plus grosses (1 cm de diamètre au maximum). On a pris comme nombre de racines, la moyenne des nombres des racines visibles notés sur les deux parois de la tranchée ; on dispose finalement de 4 répétitions correspondant aux blocs de l'essai.

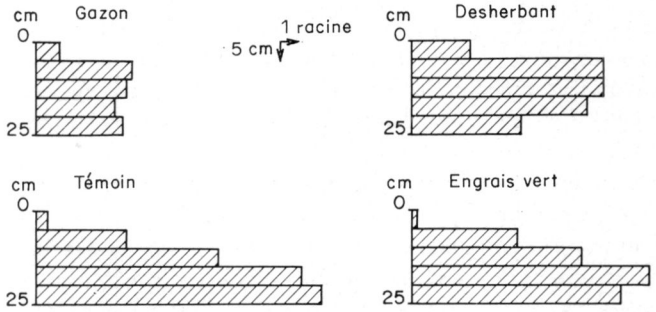


FIG. 1. — *Nombre de racines sur une coupe de sol de 25 cm de profondeur et de 200 cm de large*

Dans les parcelles travaillées, on constate la présence d'une zone assez compacte au-dessous de la limite du travail du sol ; les racines superficielles se trouvent en général près des arbres, où le travail à la main est peu profond et très exceptionnellement sous le passage des roues, où, du fait du tassement, le terrage des outils est faible (1).

Le tassement sous les roues est notable dans tous les modes d'entretien, d'où une absence quasi totale de racines dans les 10 à 15 premiers centimètres. Ce tassement n'empêche toutefois pas au-dessous de cette profondeur l'installation des racines qui exploitent tout l'interligne.

Les variances des divers traitements n'étant pas homogènes mais liées aux moyennes, on a fait l'interprétation statistique sur les variables transformées log $(x + 0{,}1)$ (2).Toutefois, pour les couches 10-15 cm et 15-20 cm, nous n'avons pas fait d'interprétation statistique les variances étant hétérogènes, mais sans liaison avec les moyennes.

Dans la couche 0-25 cm, le nombre de racines est plus petit sous le gazon (seuil 5 p. 100).

Pour la couche 0-5 cm et 5-10 cm, le nombre de racines est supérieur dans les parcelles désherbées aux seuils respectifs de 5 p. 100 et 0,1 p. 100.

Pour la couche 20-25 cm, les racines sont plus nombreuses dans le groupe travaillé (témoin-engrais vert) que dans le groupe non travaillé (gazon désherbant) au seuil 0,1 p. 100. Dans la couche 15-20 on note la même tendance sur les moyennes, mais l'impossibilité d'une discussion statistique ne permet pas de conclure.

En définitive, le gazon diminue le nombre de racines dans l'ensemble de la

(1) Dans un autre verger installé en sol argileux, seules les zones sous le passage étaient exploitées superficiellement par les racines, parce que ces zones n'étaient jamais travaillées par le cultivateur canadien.

(2) La transformation log $(x + a)$ permet de rendre ces variances homogènes, le terme constant a évitant d'obtenir des valeurs infinies pour les couches sans racines.

couche 0-25 cm. Dans les autres traitements, il y a seulement une modification de la répartition verticale, le nombre des racines superficielles étant plus grand dans les parcelles désherbées que dans l'engrais vert et le témoin.

3° Matière organique de la couche superficielle

Dans les parcelles travaillées, il y a périodiquement enfouissement de la végétation adventice qui a poussé entre deux travaux du sol. La masse végétale ainsi enfouie est faible lorsqu'on la rapporte à la surface (de l'ordre de quelques centaines de kilogrammes de matière sèche à l'ha), mais n'est pas négligeable rapportée au poids de terre travaillée sur 12 cm (de l'ordre de 0,3 pour 1 000). Cette matière végétale se décompose rapidement avec un rendement en humus vraisemblablement nul, ou du moins très faible ; comme de plus la quantité de matière végétale enfouie est peu importante, il ne faut pas s'attendre à des variations décelables de matière organique liée, du moins à court terme. Il existe, par contre, des variations assez rapides de matière organique totale et il s'ensuit qu'une comparaison faite entre un témoin et un traitement peut donner des résultats différents selon que l'époque des dosages se situe avant ou après un travail du sol. La séparation par densité de la matière organique libre permet de voir quelle est l'origine de la différence, quoiqu'au terme de la séparation il puisse subsister dans la fraction liée quelques fragments très fins appartenant à la fraction libre (G. Monnier, L. Turc et *al.*, 1962). Notons que l'interprétation des variations du taux de matière organique liée n'est pas simple, dans cette fraction peuvent se trouver, outre une partie relativement stable, assimilable à l'humus, des produits transitoires de faible durée et des produits organiques solubles en transit dans la couche de sol étudiée. Il peut y avoir en outre une légère perte de cette fraction liée par solubilisation dans le liquide de séparation.

Une difficulté considérable provient d'un approfondissement accidentel du travail du sol qui dans le verger étudié a mélangé à la couche normalement travaillée une fraction de la couche sous-jacente légèrement plus riche en matière organique liée. Il n'est pas question dans ces conditions de donner un sens absolu aux différences existant au même instant entre deux traitements si les conditions de préparation du sol nécessitent des outils différents pour chacun d'eux.

Même dans le cas où le même outil est employé à la même époque sur tous les traitements, il faut s'attendre à des variations dans le temps selon que le terrage est modifié par des conditions d'humidité, par exemple.

Compte tenu de toutes les conditions précédentes, il est pratiquement impossible d'interpréter les variations de teneur en matière organique qui apparaissent dans la parcelle témoin à de faibles intervalles de temps. Tout au plus peut-on comparer aux mêmes instants les teneurs en matière organique des divers traitements si l'on est sûr qu'aucun biais ne s'est introduit.

A la fin de la première année d'essai (fin 1963), année au cours de laquelle il n'y a pas eu d'enfouissement d'engrais vert (absence totale de germination) le gazon a provoqué une augmentation significative de matières organiques libres et liées.

En 1964, en ce qui concerne l'engrais vert, une étude particulière (G. Monnier et *al.*, 1965) montre que 5 mois après l'enfouissement du ray-grass d'Italie, il reste par rapport au témoin un supplément de moins de 0,2 p. 1 000 de carbone total,

la différence n'étant pas significative. Le supplément de carbone lié est quasi nul. Malheureusement, on n'a pu suivre cette évolution au-delà, un biais s'étant introduit lors de la préparation du lit de semence pour le semis de l'engrais vert suivant : le passage d'une moto-houe dans les seules parcelles engrais vert a mélangé à la couche normalement travaillée 1 à 2 cm de terre profonde titrant 10,7 p. 1 000 de carbone lié au lieu de 7,8, ce qui provoque une augmentation calculée de 0,3 p. 1 000 de carbone lié dans les parcelles engrais vert seulement sans aucun apport organique extérieur. Effectivement, une telle différence a été obtenue lors du prélèvement de novembre 1964. Aussi, ne tiendrons-nous pas compte de ces chiffres.

Lors de la 2e année d'essai on constate une augmentation de la matière organique libre et liée dans les parcelles « gazon ». Il n'y a pas de différences pour la matière organique liée entre le désherbant et le témoin ; pour ce qui est de la matière organique libre, il y en a moins dans les parcelles désherbées que dans le témoin, mais la différence n'est pas significative.

4° Stabilité structurale de la couche 0-10 cm

L'étude de la stabilité structurale se fait à partir de l'indice global log 10 I_s et des éléments entrant dans son calcul. Toutefois, nous substituerons aux quantités d'agrégats celles des « agrégats vrais » qui s'obtiennent à partir des précédentes en retranchant la quantité de sable 200 μ-2 mm.

Nous avons considéré les valeurs suivantes :

log 10 I_s : indice global de stabilité ;

0-20 μ = éléments de diamètre inférieur à 20 μ résultant de la destruction des agrégats (p. 100 de terre sèche).

Ag_a = agrégats vrais après prétraitement alcool
Ag_b = agrégats vrais après prétraitement benzène
Ag = agrégats vrais sans prétraitement
} p. 100 de terre sèche

Rappelons que la stabilité structurale présente en général une variation saisonnière avec maximum d'été et minimum d'hiver (Monnier G., 1965).

Nous indiquons dans la figure 2 l'allure des variations et dans le tableau 1 les comparaisons les meilleures d'après les critères définis en introduction. Les critères statistiquement valables sont soit l'*absence absolue de végétation*, soit la *végétation permanente*.

On a constaté les faits suivants :

— Avril 1962 : avant l'installation de l'essai, les stabilités sont sensiblement identiques.

— Novembre 1963 : 8 mois après le semis du gazon, 9 mois après l'application d'herbicide et sans engrais vert pendant l'hiver 1962-63, la végétation permanente (gazon) produit une amélioration significative et importante de la stabilité structurale (indice global et composantes de l'indice). Pas d'interaction azote-mode d'entretien et pas d'action de l'azote.

— Au cours de l'été 1964, l'augmentation saisonnière de stabilité se manifeste pour tous les modes d'entretien à l'exception du désherbant.

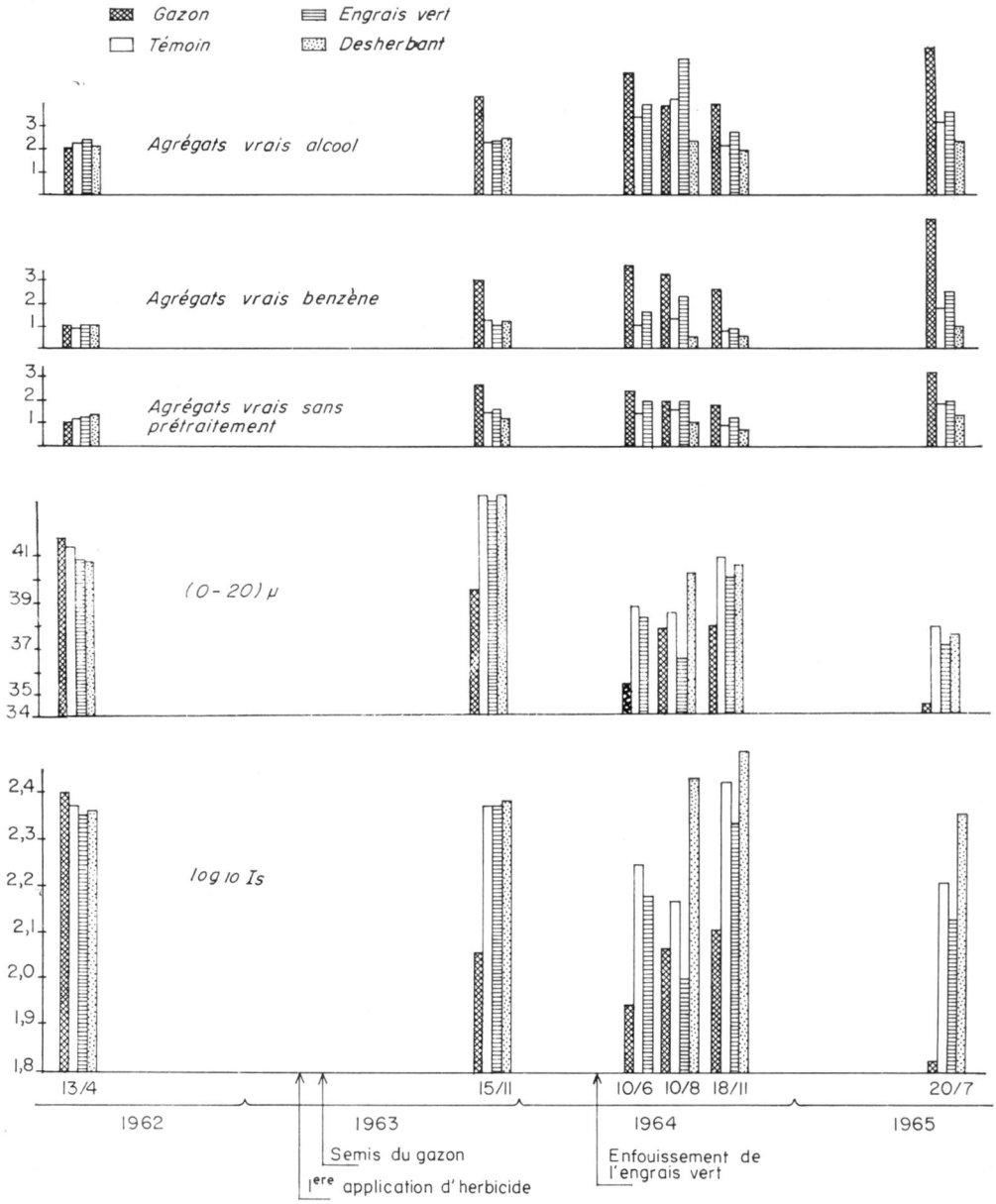


FIG. 2. — *Stabilités structurales.*
Les agrégats vrais et les éléments 0-20 μ sont exprimés en p. 100 de terre sèche

TABLEAU I

Comparaisons entre traitements

	15-11-1963		10-6-1964		10-8-1964		18-11-1964		20-7-1965	
log 10 I_s	G < DTV D *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G < TV T *vs* V	*** N. S.	D > GTV GV < T G *vs* V	*** ** N. S.	G < DTV D > TV T > V	*** ** *	G < DTV D > TV T *vs* V	*** ** N. S.
(0-20) μ	G < DTV D *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G < TV T *vs* V	* N. S.	D > GTV GV < T G *vs* V	*** ** N. S.	G < DTV D *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G < DTV D *vs* TV T *vs* V	** N. S. N. S.
Ag_a	G < DTV G *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G > TV T *vs* V	* N. S.	D < GTV G *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G > DTV D *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G > DTV D < TV T *vs* V	*** * N. S.
Ag_b	G < DTV G *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G > TV T *vs* V	*** N. S.	D < GTV G > TV T < V	*** ** *	G > DTV D *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G > DTV D < TV T *vs* V	*** *** N. S.
Ag	G < DTV G *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.	G > TV T *vs* V	* N. S.	D < GTV G *vs* TV T *vs* V	* N. S. N. S.	G > DTV D < TV T *vs* V	*** * N. S.	G > DTV D *vs* TV T *vs* V	*** N. S. N. S.

Rem. = Seuil de signification. : N. S. = non significatif.
* = 5 p. 100
** = 1 p. 100
*** = 0,1 p. 100

Rappel des abréviations :
G = engazonnement.
D = sol nu desherbé.
T = sol nu travaillé avec enherbement spontané d'hiver.
V = sol nu travaillé avec engrais vert d'hiver.

. Juin : stabilité supérieure du gazon par rapport au groupe témoin-engrais vert, le désherbant n'ayant pas été prélevé. On n'a pu distinguer à ce moment-là le témoin de l'engrais vert, mais cette constatation n'a pas de valeur générale, puisque au cours de l'étude détaillée relatée par ailleurs (G. MONNIER et R. GRAS, 1965) des augmentations de stabilité significative, mais de faible amplitude, ont été constatées par rapport au témoin.

. Août : l'absence de remontée estivale pour le désherbant permet de regrouper les traitements selon le critère de l'absence absolue de végétation (D *versus* GTV) pour tous les éléments comparés. Le groupe avec végétation artificielle (G-V) est meilleur que le témoin pour log 10 I_s.

— Novembre 1964 : les stabilités qui diminuent pour reprendre leur niveau d'hiver se rapprochent de celle du désherbant (qui n'a pas eu d'augmentation d'été). La stabilité du gazon restant plus élevée, le regroupement G *versus* DTV devient le meilleur pour toutes les variables étudiées. L'engrais vert diffère du témoin pour log 10 I_s seulement. Il n'y a aucune action de l'azote et aucune interaction azote-mode d'entretien.

— Juillet 1965 : la remontée saisonnière très importante du gazon explique que le regroupement G *versus* DTV soit le meilleur. En général le désherbant diffère du groupe témoin-engrais vert. Il n'est pas possible de faire apparaître de différences significatives entre témoin et engrais vert.

— Entre les mois de novembre 1963 et 64, on constate pour le témoin et le désherbant une baisse de stabilité :

. pour le témoin, seule la diminution d'Ag_b (— 40 p. 100) est significative ;

. pour le désherbant, les diminutions de log 10 I_s et d'Ag_b (50 p. 100) sont significatives.

En définitive, dans le temps le gazon a provoqué rapidement une augmentation importante de la stabilité structurale ; l'enfouissement d'un engrais vert provoque une amélioration beaucoup plus faible et transitoire. La 2e année, dans les parcelles désherbées on constate, outre l'absence de remontée estivale une légère diminution de stabilité.

5° INFILTRATION DE L'EAU

Mesurée par la méthode Muntz. La hauteur d'eau percolée pendant une heure a été prise comme indice de la perméabilité de la couche de terre épaisse de 6 cm contenue dans le cylindre.

A — *Couche de surface*

a) *Fin de l'hiver* (fin mars, début avril 1964).

Mesures exécutées avant le travail du sol, immédiatement après une pluie sur une terre très humide et uniquement dans les parcelles à dose double d'azote. Les points de mesures étaient localisées au centre (C) de l'interligne et sous le passage des roues (R).

L'examen de la surface du sol ayant montré l'existence d'un réseau de fentes dans les parcelles désherbant et témoin, les cylindres de mesures ont été disposées

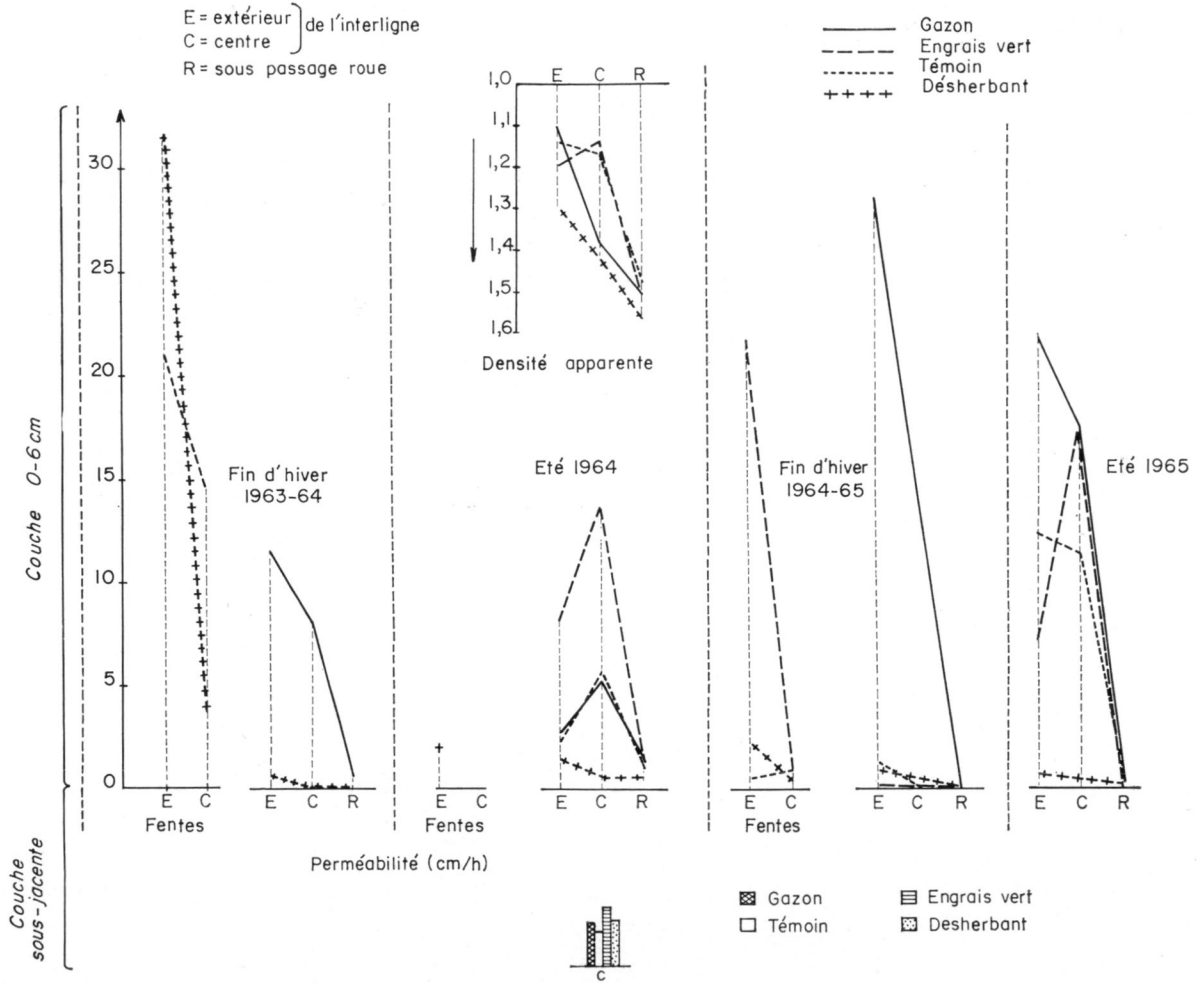


FIG. 3. — *Ensemble des mesures de perméabilité et de densité apparente*

de façon à ne recouper aucune fente et à mesurer ainsi la perméabilité de masse du sol.

Le graphique n° 3 rassemble les moyennes de résultats obtenus.

Pour l'interprétation statistique on a dû adopter la transformation log $(x + 0{,}1)$ (1). La position dans l'interligne est considérée comme un facteur subsidiaire de variation (*split-plot*).

Lorsqu'on considère les effets principaux : le critère *végétation permanente* est le plus satisfaisant pour classer les modes d'entretien ; la perméabilité du traitement à végétation permanente (gazon) est supérieure à celle des 3 autres au seuil 0,1 p. 100 ; la perméabilité sous le passage des roues est inférieure à celle de l'interligne (seuil 5 p. 100).

L'interaction (G *vs* DTV) × (C *vs* R) est significative au seuil 5 p. 100 (fig. 4).

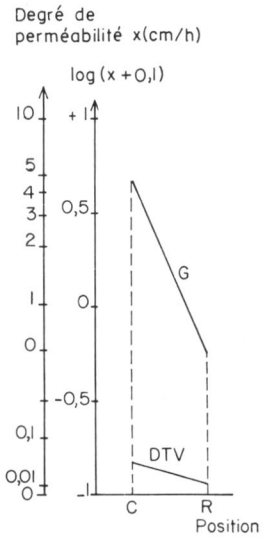


FIG. 4. — *Degré de perméabilité en surface à la fin de l'hiver 1963-64*
Interaction mode d'entretien-position dans l'interligne
C : centre interligne.
R : sous passage roue.

Moyennes (variables transformées) des mesures d'infiltration
Fin d'hiver 1963-64

	Gazon	Désherbant	Témoin	Engrais vert
Centre interligne.....	0,672	— 0,880	— 0,750	— 0,849
Sous passage roues	— 0,246	— 1,000	— 0,924	— 0,924

p.p.d.s. pour mode d'entretien à une position donnée dans l'interligne = 0,487.
p.p.d.s. pour position dans interligne, le mode d'entretien étant donné = 0,379.

(1) Cf. note 2, p. 671.

Elle traduit le fait que l'action améliorante du gazon est moins intense sous le passage des roues qu'au centre de l'interligne.

Lors de la même série de mesures nous avons comparé sous le rang la perméabilité de l'engrais vert et du gazon (fig. 3) : celle du gazon était significativement supérieure (5 p. 100) à celle de l'engrais vert, ce qui va dans le même sens que les résultats précédents.

Pour avoir une idée de la capacité d'infiltration des fentes, on a placé des cylindres de mesure au point de convergence des fentes pour les traitements témoin et désherbant. Les mesures ont été faites au centre et à l'extérieur de l'interligne. On n'a pas pu séparer significativement le témoin et le désherbant, par contre, la capacité d'infiltration est significativement plus élevée sous la rangée d'arbres.

Conclusions : A la sortie de l'hiver, le sol encore très humide présentait un réseau de fissures nettes dans les parcelles témoin et désherbant. La capacité d'infiltration de ces fentes était plus importante sous la rangée d'arbres qu'au centre de l'interligne.

Pour les perméabilités de masse, on aboutit aux conclusions suivantes : avant le travail du sol (témoin-engrais vert) le critère végétation permanente est le plus efficace pour classer les modes d'entretien. Sous gazon la perméabilité est supérieure à celle du groupe désherbant-témoin-engrais vert, tant au centre de l'interligne que sous le passage des roues. Cette action positive du gazon est moins intense sous le passage des roues. Il n'y a pas de différences significatives dans le groupe désherbant-témoin-engrais vert.

Quoique les valeurs moyennes soient toujours inférieures dans la zone de passage des roues, elles ne diffèrent significativement de celles de la zone hors passage que pour le gazon.

b) *Été* (juin 1964).

Mesures effectuées 25 jours après le 4e travail du sol de l'année (1), au centre de l'interligne (C), sous la rangée d'arbres, dans la région extérieure (E) de l'interligne encore concernée par le travail au tracteur et sous le passage des roues (R). Dans les parcelles travaillées la terre était suffisamment rassise pour qu'on puisse y effectuer la mesure de la perméabilité de masse. Dans les parcelles non travaillées on a effectué les mesures entre les fissures de dessiccation.

L'interprétation statistique a été faite comme pour les mesures précédentes (*split-plot*) après la transformation log $(x + 0{,}1)$. L'influence du passage des roues s'étudie en comparant les mesures sous le passage (R) au groupe extérieur centre(EC).

L'analyse de variance (tabl. 2) permet de dégager les conclusions suivantes :

Pour les effets principaux :

— l'action des modes d'entretien s'explique par l'addition des effets positifs du travail (seuil 0,1 p. 100) et de la végétation installée (seuil 0,1 p. 100), puisque l'interaction entre ces 2 facteurs n'est pas significative ;

— l'effet position dans l'interligne est significatif au seuil 0,1 p. 100 et il reste significatif si on le teste par rapport à l'interaction mode d'entretien-position. Cet effet position est essentiellement dû au passage des roues.

(1) Il est tombé 44 mm de pluie en 6 jours depuis le dernier travail du sol.

L'interaction mode d'entretien-position dans l'interligne, significative au seuil 5 p. 100 seulement, indique que la totalité de l'effet sur la perméabilité ne peut être expliquée par l'addition des actions des modes d'entretien et de la position dans l'interligne. La décomposition des 6 degrés de liberté de cette interaction permet d'obtenir les renseignements suivants :

TABLEAU 2

Analyse de variance des mesures d'infiltration d'été 1964

Origine de la variation	Somme des carrés des écarts	Degré de liberté	F
Bloc	0,180 493	3	
Mode d'entretien	3,977 456	3	18,69***
travail (GD *vs* TV)	1,654 661	1	23,32***
végétation (GV *vs* DT)	2,130 261	1	30,03***
interaction travail végétation	0,192 533	1	2,71 NS
Erreur *a*	0,638 347	9	
Position dans l'interligne	4,445131	2	29,20***
passage des roues (EC *vs* R)	4,222 687	1	55,65***
extérieur centre (E *vs* C)	0,222 444	1	NS
Entretien × position dans interligne	1,436 079	6	3,15*
(GD *vs* TV) × (EC *vs* R)	0,479 968	1	4,26*
(GV *vs* DT) × (EC *vs* R	0,099 975	1	1,31 NS
travail végétation × (EC vs R)	0,124 992	1	1,64 NS
(GD *vs* TV) × (E *vs* C)	0,373 680	1	4,92*
(GV *vs* DT) × (E *vs* C)	0,107 184	1	1,41 NS
travail × végétation × (E *vs* C)	0,250 278	1	3,29 NS
Erreur *b*	1,820 894	24	

Moyennes (variable transformée) des mesures d'infiltration d'été 1964

	Gazon	Désherbant	Témoin	Engrais vert
Extérieur d'interligne	0,374	0,126	0,300	0,793
Centre d'interligne	0,617	— 0,215	0,744	1,114
Sous passage roues	0,090	— 0,473	— 0,113	— 0,092

p.p.d.s. pour mode d'entretien, à une position donnée dans l'interligne = 0,406.
p.p.d.s. pour position dans interligne, le mode d'entretien étant donné = 0,396.

(GD *vs* TV) × (EC *vs* R) : la perméabilité dans le groupe travaillé est supérieure à celle du groupe non travaillé seulement hors du passage des roues (fig. 5 *a*).

(GD *vs* TV) × (E *vs* C) : l'amélioration de perméabilité dans le groupe travail est plus intense au centre de l'interligne qu'à son extérieur (fig. 5 *c*).

Du fait des interactions précédentes, nous avons fait des analyses de variance pour chacune des positions de l'interligne :

— extérieur : la perméabilité du groupe végétation artificielle est supérieure à celle du groupe sans végétation. Il n'y a pas d'influence significative du travail du sol ni d'interaction travail végétation artificielle ;

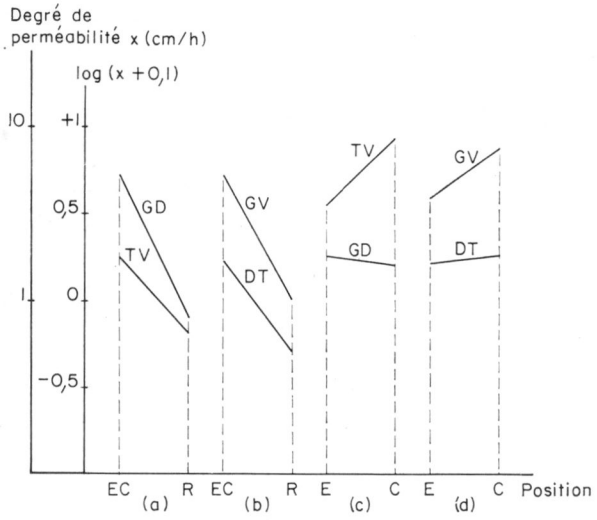


FIG. 5. — *Degré de perméabilité en surface pendant l'été 1964*
Interaction mode d'entretien-position dans l'interligne

— centre : le groupe travail a une perméabilité plus élevée que le groupe non travail. Le groupe végétation a une perméabilité plus élevée que le groupe sans végétation. Pas d'interaction travail-végétation ;

— sous le passage des roues, il n'y a aucune différence entre les groupes séparés par les critères végétation et travail et pas d'interaction entre travail et végétation.

Conclusion : Pendant l'été, à un moment où le sol des parcelles travaillées a été suffisamment rassis par les pluies, on peut tirer les conclusions suivantes :

Globalement, les différences constatées entre les modes d'entretien peuvent s'expliquer par l'addition des influences positives du travail du sol et la végétation artificielle.

C'est sous le désherbant que la perméabilité moyenne est la plus faible. Cette action dépressive est plus intense au centre de l'interligne (désherbant significativement inférieur à tous les autres traitements) qu'en son centre (désherbant ne diffèrant significativement que de l'engrais vert). Dans le désherbant, la perméabilité sous les roues ne diffère pas de celle de l'engrais vert.

Les parcelles gazon et témoin ont une perméabilité sensiblement identique, quelle que soit la position dans l'interligne.

D'une façon générale, la perméabilité est significativement plus faible sous le passage des roues. Du fait du mode d'action propre des modes d'entretien cette conclusion se nuance ainsi : pour l'engrais vert la perméabilité sous le passage des

roues est significativement inférieure à celle des deux autres endroits ; dans le cas du gazon seule la perméabilité au centre est supérieure à celle de la zone de circulation ; pour le désherbant la perméabilité sous la zone de passage est significativement inférieure à celle de l'extérieur mais n'est pas différente de celle du centre. Sur le témoin les perméabilités à l'extérieur et au centre sont supérieures à celles de la zone de passage.

c) *Fin de l'hiver* (fin mars 1965).

Mesures effectuées avant le travail du sol, qui était très humide. On n'a pas fait de mesures au centre de l'interligne pour les parcelles gazon et désherbant, le passage d'un localisateur d'engrais laissant encore des traces pour ces deux traitements.

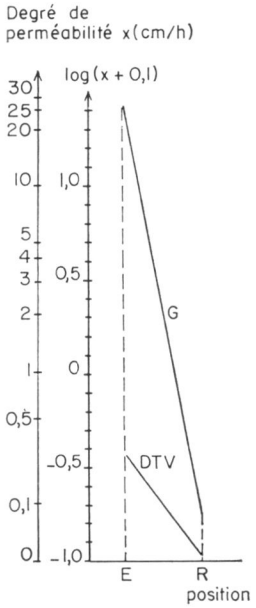


FIG. 6. — *Degré de perméabilité en surface à la fin de l'hiver 1964-65*
Interaction mode d'entretien-position dans l'interligne.

Moyennes (variables transformées) des mesures d'infiltration de fin d'hiver 1964-65

	Gazon	Désherbant	Témoin	Engrais vert
Extérieur interligne	1,425	— 0,309	— 0,198	— 0,781
Sous passage roues	— 0,745	— 1,000	— 0,963	— 0,963

p.p.d.s. mode d'entretien, à position donnée dans interligne = 0,517
p.p.d.s. position dans interligne, mode d'entretien étant donné = 0,562

Il existe un réseau de fentes assez dense dans tous les traitements sauf le gazon. Leur capacité d'infiltration est assez limitée (fig. 3).

Les cylindres de mesure ont été disposés de façon à ne recouper aucune fente. L'analyse de variance a été effectuée après la transformation log $(x + 0{,}1)$.

Pour ce qui est des effets principaux, le critère *végétation permanente* permet de séparer des autres traitements le gazon qui leur est supérieur (seuil 0,1 p. 100) ; la perméabilité est plus élevée au centre que sous le passage des roues (seuil 0, 1 p. 100) L'interaction mode d'entretien position dans l'interligne provient essentiellement de l'interaction (G *vs* DTV) × (E *vs* R) (fig. 6) significative au seuil 1 p. 100, ceci provient du fait que l'effet améliorant du gazon est nul sous le passage des roues.

Conclusion : Le sol humide présente à la fin de l'hiver 1965 un réseau de fissures nettes dans tous les modes d'entretien sauf l'engazonnement.

Hors du passage des roues, la perméabilité de masse du gazon est élevée et significativement supérieure à celles des autres traitements qui sont voisines de zéro. La perméabilité du témoin est supérieure à celle de l'engrais vert.

Sous le passage des roues, la perméabilité du gazon n'est pas supérieure à celles des autres traitements ; l'action améliorante du gazon y est de ce fait pratiquement nulle.

Pour tous les traitements, sauf l'engrais vert, la perméabilité sous le passage des roues est inférieure à celle de l'extérieur de l'interligne.

d) *Été* (Juin 1965).

Nous avons effectué les mesures pour les parcelles gazon et désherbant les 15 et 16 juin et pour les parcelles témoin et engrais vert les 20 et 22 juillet, le sol étant trop motteux en juin. Dans les parcelles travaillées, les mesures ont été réalisées 20 jours environ après un travail du sol (1).

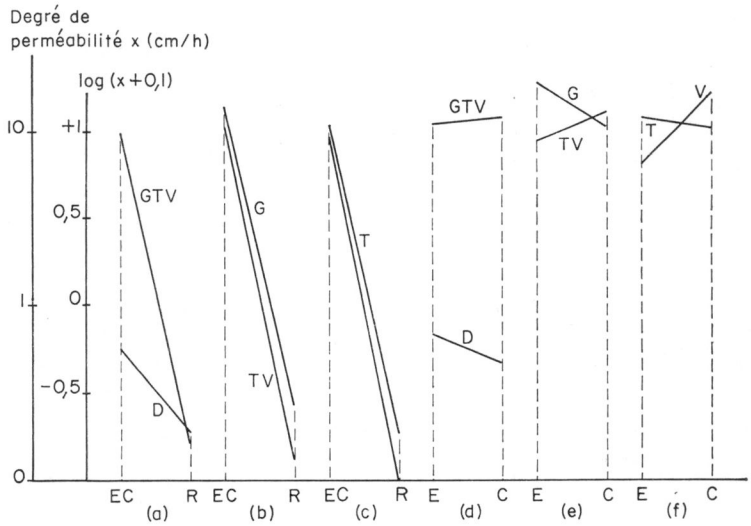


FIG. 7. — *Degré de perméabilité en surface, été 1965*
Interaction mode d'entretien-position dans l'interligne

(1) Depuis le dernier travail du sol il est tombé 40 mm d'eau en 3 fois.

Le tableau 3 et le graphique 7 permettent de dégager les conclusions suivantes :

Conclusion : quoique le classement des modes d'entretien par les critères travail et végétation artificielle soit significatif, nous n'avons pas conservé ce groupe de comparaison, l'interaction travail-végétation étant significative. Le meilleur critère est alors celui de l'*absence absolue de végétation.*

TABLEAU 3

Analyse de variance des mesures d'infiltration de l'été 1965
log (x + 0,1)

Origine de la variance	Somme des carrés des écarts	Degré de liberté	F
Bloc	0,097 814	3	1 < NS
Modes d'entretien	6,859 969	3	16,14***
désherbant *vs* gazon-témoin engrais vert	6,458 481	1	46,22***
gazon *vs* témoin-engrais vert	0,253 472	1	1,78 NS
témoin *vs* engrais vert	0,058 016	1	1 < NS
Erreur *a*	1,232 730	9	
Position dans interligne	24,101 230	2	114,68***
passage des roues (EC *vs* R)	24,099 102	1	229,13***
extérieur centre	0,002 128	1	1 < NS
Entretien × position dans interligne	4,466 644	6	7,08***
(D *vs* GTV) × (EC *vs* R)	3,845 457	1	36,59***
(G *vs* TV) × (EC *vs* R)	0,057 240	1	1 < NS
(T *vs* V) × (EC *vs* R)	0,048 705	1	1 < NS
(D *vs* GTV) × (E *vs* C)	0,046 772	1	1 < NS
(G *vs* TV) × (E *vs* C)	0,246 390	1	2,34 NS
(T *vs* V) × (E *vs* C)	0,222 076	1	2,11 NS
Erreur *b*	2,521 786	24	

Moyennes (variables transformées) des mesures d'infiltration de l'été 1965

	Gazon	Désherbant	Témoin	Engrais vert
Extérieur interligne	1,270	— 0,179	1,072	0,801
Centre interligne	1,011	— 0,327	1,007	1,208
Sous passage roues	— 0,589	— 0,716	— 0,774	— 1,000

p.p.d.s. mode entretien pour position donnée dans interligne = 0,518
p.p.d.s. position dans interligne, mode d'entretien étant donné = 0,475

L'interaction mode d'entretien-position dans l'interligne provient du fait que la différence entre les perméabilités hors et sous le passage des roues est moins accentuée pour le désherbant que pour les autres traitements (fig. 7 *a*).

Tant à l'extérieur qu'au centre, la perméabilité du désherbant est plus faible que celle du groupe gazon-engrais vert-témoin. Dans ce dernier groupe aucune différence n'est significative quoique le gazon ait tendance à être le plus perméable des traitements à l'extérieur de l'interligne et l'engrais vert au centre.

La perméabilité est quasi nulle sous le passage des roues et il n'existe pas pour cette position de différences entre les modes d'entretien.

B — *Couche sous-jacente* (juillet 1964)

Le but de cette série de mesures était la détermination de la perméabilité dans un volume de sol contenant le fond du labour. A cet effet, on a enfoncé les cylindres de mesures de façon à recouper la sole de labour éventuelle : dans le cas du témoin et de l'engrais vert on a déterminé par observation le fond du travail du sol. Dans les parcelles non travaillées, on a enfoncé le cylindre dans la couche 10-16 cm de façon à inclure dans le volume de mesure la semelle éventuelle qui aurait pu se former alors que le sol était travaillé.

Les mesures ont été faites au centre de l'interligne dans les parcelles N_2 (fig 3).

Aucune différence significative n'a été constatée.

6° Densité apparente de la couche superficielle (juin 1964)

La couche de sol concernée par les mesures était située entre 1 et 5 cm de profondeur, ce qui excluait la croûte superficielle existant dans certains traitements. Les mesures ont été effectuées dans les parcelles N_2, en 3 endroits : région extérieure de l'interligne (E), région centrale (C) et zone de passage des roues (R).

Préalablement à toute interprétation on a vérifié que les traitements ne modifiaient pas de façon appréciable la densité réelle d_r du sol, notamment lorsqu'il y a de gros apports organiques. Après mesures des densités réelles correspondant aux prélèvements de densités apparentes, on a constaté une légère diminution de la densité réelle sous le gazon (2,619 contre 2,636) qui se traduit par une variation relative $100\,\frac{\Delta d_r}{d_r}$ de 0,64 p. 100. On peut écrire la densité apparente.

$$d_a = \frac{\text{poids}}{\text{volume apparent}} = \frac{\text{volume réel}}{\text{volume apparent}} \times \text{densité réelle.}$$

En admettant que la variation de densité réelle n'entraîne pas directement de variation de volume réel, la variation Δd_a de la densité apparente est reliée à celle de la densité réelle par $100\,\frac{\Delta d_a}{d_a} = 100\,\frac{\Delta d_r}{d_r} = 0{,}64$ p. 100. La modification ainsi introduite est négligeable compte tenu de la précision de mesures de densité apparente.

Le meilleur classement est obtenu ici par le critère « *absence absolue de végétation* » qui, du point de vue de l'effet moyen, sépare le désherbant du groupe des autres traitements. Par rapport à ce groupe, l'action dépressive du désherbant ne se manifeste pas significativement sous les roues (fig. 8 *a*), mais au centre et à l'extérieur de l'interligne (fig. 8 *d*).

Par rapport au groupe témoin-engrais vert, le gazon agit différemment suivant sa position dans l'interligne, au centre, la densité sous gazon est supérieure à celle du témoin et de l'engrais vert, tandis qu'à l'extérieur elle est inférieure à celle de l'engrais vert seulement (fig. 8 *e*).

TABLEAU 4

Analyse de variance des mesures de densités apparentes de l'été 1964

Origine de la variation	Somme des carrés d'écarts		Degré de liberté	F
Bloc	0,017 0		3	1,61 NS
Mode d'entretien	0,196 8		3	18,74***
désherbant *vs* gazon-témoin-engrais vert		0,168 7	1	48,21***
gazon *vs* témoin-engrais vert		0,024 5	1	7,01*
témoin *vs* engrais vert		0,003 5	1	1,00 NS
Erreur *a*	0,319 0		9	
Position dans l'interligne	0,971 2		2	131,24***
passage des roues (EC *vs* R)		0,900 0	1	243,20***
extérieur centre (E *vs* C)		0,070 2	1	18,91***
Entretien × position dans interligne	0,155 4		6	7,00***
(D *vs* GTV) × (EC *vs* R)		0,019 6	1	5,31*
(G *vs* TV) × (EC *vs* R)		0,008 7	1	2,35 NS
(T *vs* V) × (EC *vs* R)		0,001 0	1	1 NS
(D *vs* GTV) × (E *vs* C)		0,004 0	1	1,08 NS
(G *vs* TV) × (E *vs* C)		0,116 0	1	31,36***
(T *vs* V) × (E *vs* C)		0,005 6	1	1,51 NS
Erreur *b*	0,089 0		24	

Moyenne des mesures de densité apparente

	Gazon	Désher-bant	Témoin	Engrais vert
Extérieur d'interligne	1,10	1,29	1,14	1,20
Centre d'interligne	1,38	1,42	1,16	1,14
Sous passage roues	1,51	1,57	1,48	1,52

p.p.d.s. mode d'entretien pour position donnée dans interligne = 0,089
p.p.d.s. position dans interligne, mode d'entretien fixé = 0,086

Pour les modes d'entretien avec travail du sol, les densités ont la même valeur à l'extérieur et au centre ; en l'absence de travail, la densité est plus élevée au centre de l'interligne et diffère alors significativement des traitements avec travail.

Il n'y a pas de différence entre témoin et engrais vert quelle que soit la position dans l'interligne. (fig. 8 *c* et *f*).

La densité apparente est plus élevée sous le passage des roues, quel que soit le mode d'entretien. A cet endroit, le sol est plus tassé sous le désherbant que sous le témoin.

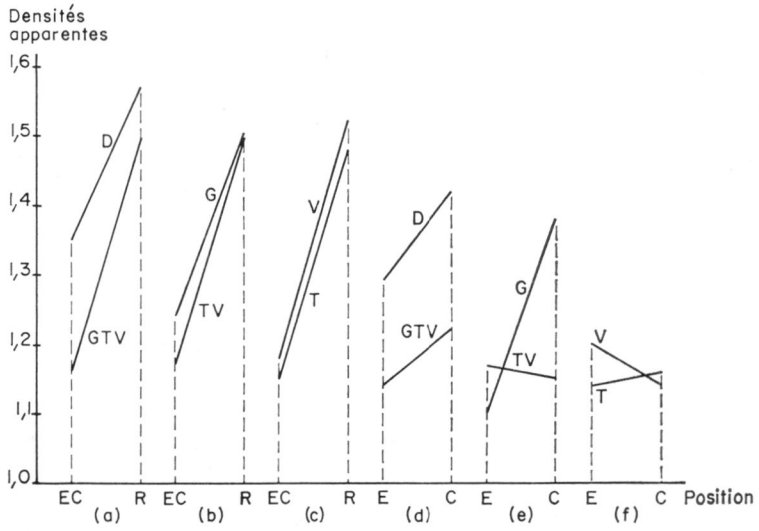


FIG. 8. — *Densités apparentes en été 1964*
Interaction mode d'entretien-position dans l'interligne.

Quoique du fait du phénomène de gonflement notamment, la porosité n'ait pas un sens absolu, nous allons calculer celle-ci pour les valeurs moyennes des densités apparentes. Le tableau 11 montre que les valeurs assez élevées de la porosité totale varient parallèlement aux densités apparentes. Il est plus intéressant de calculer la macroporosité, c'est-à-dire la fraction de la porosité accessible à l'air une fois le sol à la capacité au champ. Le tableau 12 indique les résultats de ces calculs.

TABLEAU 5

Porosité totale (p. 100 volume apparent)

	Gazon	Désherbant	Témoin	Engrais vert
Extérieur	57,9	51,1	56,7	54,4
Centre	47,6	46,5	56,3	56,9
Sous passage des roues...	42,3	40,2	43,8	42,3

Les auteurs s'accordant pour considérer que 10 p. 100 est la limite de macroporosité au-dessous de laquelle l'aération du sol peut être perturbée, de tels phénomènes sont à redouter sous le passage des roues seulement. Même dans ce cas l'aération peut se faire par diffusion latérale des gaz.

TABLEAU 6

Macroporosité (p. 100 volume apparent)

	Gazon	Désherbant	Témoin	Engrais vert
Extérieur	32,1	20,8	30,0	26,2
Centre	15,2	13,2	29,1	30,2
Sous passage des roues...	6,9	3,4	9,1	6,6

7° Alimentation en eau

On peut concevoir que les modes d'entretien du sol interviennent sur l'alimentation en eau des arbres en modifiant :

— la perméabilité du sol : une amélioration de la perméabilité de la couche de surface réduit la fraction d'eau qui ruisselle. La disparition d'une semelle de labour facilite la pénétration de l'eau en profondeur et évite sa réévaporation directe à partir de la couche de surface ;

— l'évapotranspiration : en l'absence de végétation il peut s'agir de la modification de la perte d'eau par évaporation directe de la surface du sol. Lorsqu'il y a des plantes associées, si l'évapotranspiration est augmentée pendant une période ou l'évapotranspiration est supérieure à la pluviométrie, les réserves du sol seront plus rapidement épuisées.

Lorsque les précipitations hivernales sont largement excédentaires, les différences dues aux traitements peuvent ne pas se manifester, la capacité de réserve du sol finissant par se remplir, même si le ruissellement est plus fort sur certaines parcelles.

Certains traitements facilitant la pénétration de l'eau, augmentent également l'évapotranspiration, c'est le cas de la végétation associée.

Nous n'avons pas effectué les mesures d'humidité du sol qui nous auraient permis de préciser les points précédents et nous nous sommes bornés à calculer chaque année un bilan de l'eau mois par mois à partir de la pluviométrie mesurée, de l'évapotranspiration calculée par la formule de Turc et d'une capacité de réserve du sol de 180 mm. Ce calcul permet seulement de caractériser le bilan de l'eau de l'année.

En 1963, les réserves du sol ne se sont jamais annulées ; leur niveau le plus bas se situait en octobre où il restait cependant dans le sol 33 p. 100 de la capacité de réserve.

En 1964, les réserves du sol ont été nulles à la fin de chacun des mois de juillet, août et septembre ; il aurait fallu apporter 163 mm pour que les réserves du sol ne s'annulent pas.

DISCUSSION

Le mode d'entretien modifie les propriétés physiques du sol essentiellement dans une couche superficielle plus ou moins épaisse selon la technique utilisée :

— dans le cas du travail du sol, on distingue la zone directement concernée par le travail (limitée à sa base par le fond du labour) et une couche au-dessous où l'influence indirecte du travail du sol se manifeste par un lissage ou un tassement. La limite inférieure assez imprécise de cette dernière zone correspond à l'endroit où l'action indirecte du travail cesse ;

— lorsqu'il n'y a aucun travail, la séparation en deux zones tombe d'elle-même. Cependant, le verger ayant été en général préalablement travaillé, il est bon de considérer ce qui se passe au niveau de l'ancienne limite de travail pour voir comment elle évolue ;

— si le mode d'entretien comporte l'établissement d'une végétation artificielle permanente ou temporaire, l'action des racines de ces plantes décroît assez rapidement avec la profondeur, mais dépasse la limite de la zone travaillée.;

— un apport superficiel de matière organique peut avoir une certaine action sur la structure et la stabilité des couches profondes par l'intermédiaire de la faune. Les produits organiques solubles peuvent également intervenir sur la stabilité des couches profondes, mais cette action n'aura d'intérêt que si la structure est convenable au moment de l'effet stabilisant.

Une fraction relativement faible du système radiculaire des arbres s'installe dans les couches de surface entre deux façons superficielles ou en permanence si le sol n'est pas travaillé (gazon, désherbant). Il n'est d'ailleurs pas certain que le rôle des racines superficielles pour l'absorption de certains éléments ne soit pas plus grand que celui que laisserait prévoir leur importance relative.

Les considérations précédentes montrent que, à des degrés divers selon les modes d'entretien, une couche relativement peu importante est concernée par les modifications des propriétés physiques. Seule une fraction du système radiculaire de l'arbre se trouve dans cette couche. On conçoit ainsi qu'en général, un des rôles essentiels des modes d'entretien soit de maintenir en bonne condition la couche superficielle, de façon à permettre les échanges entre l'atmosphère et la couche de sol où se trouve la majorité du système radiculaire.

1° *Installation des racines de pommiers dans la couche de surface*

Lorsque le sol est travaillé, les racines sont très peu nombreuses dans les 10 premiers cm ; on en trouve seulement quelques-unes près de la rangée d'arbres où le travail fait à la main est peu profond.

Par rapport aux modes d'entretien précédents l'absence de travail et de végétation (sol nu désherbé) permet aux racines un développement plus superficiel (quel-

ques-unes sont à 1,5 cm de la surface du sol), mais sans modifier la quantité de racines dans la couche 0-25 cm.

Le gazon diminue le nombre de racines dans la couche 0-25 cm, la densité dans la couche 0-10 étant la même que lorsque le sol est travaillé, c'est-à-dire presque nulle.

Dans le cas de sol nu désherbé nos observations sont en contradiction avec celles d'autres auteurs : absence de racines d'arbres fruitiers dans les 8 premiers cm en Californie (M. KIMBALL, 1951 ; E. PROEBSTING, 1955) ; pas de racines de citrus dans la couche 0-10 cm en Australie (H. FRITH, 1952). La température de la couche de sol superficielle atteindrait dans les régions chaudes des valeurs supérieures à la limite compatibles avec la croissance des racines. Il n'en serait pas de même en région tempérée où en outre le sol nu désherbé est plus humide que le sol engazonné.

Pour le gazon nos constatations sur l'absence presque totale de racines superficielles concordent avec celles de P. PISANI (1960) sur le pêcher en Italie, mais diffèrent de celles de E. COKER (1959) sur pommiers non irrigués en Angleterre, de H. FRITH (1952) sur citrus irrigués en Australie et de V. KOTOV (1964) en Russie sur pommiers irrigués. Comme le gazon provoque un dessèchement de la surface du sol, on peut penser que les racines de pommier ne s'y développent qu'en zones humides ou irriguées. L'absence d'exploitation de la couche superficielle pourtant non travaillée pourrait s'expliquer par une augmentation de la cohésion du sol consécutive à la dessiccation.

Remarquons enfin que dans le groupe du sol non travaillé, nos observations (racines superficielles plus nombreuses en sol nu désherbé que sous gazon) sont en opposition avec celles de H. FRITH (1952) obtenues en zone plus chaude et irriguée. On peut penser que dans cette région le gazon par son « mat » superficiel joue un rôle isolant et empêche le sol d'atteindre les températures excessives qui existent en sol désherbé. L'irrigation supprimerait la limitation constituée par le dessèchement de la surface.

Des considérations d'humidité (climat naturellement humide, pratique de l'irrigation) et de température pourraient expliquer la diversité des comportements signalés ci-dessus. On pourrait notamment s'attendre à ce qu'en sol nu désherbé les radicelles soient moins superficielles dans le midi que dans la région parisienne. De même, l'irrigation donnerait sous gazon un enracinement plus superficiel que nous ne l'avons constaté.

2° *Matière organique et stabilité structurale de la couche superficielle*

La matière organique étant un facteur essentiel de la stabilité structurale, nous examinerons ces deux questions simultanément, les convergences de résultats pouvant faciliter l'obtention d'une explication.

L'influence des modes d'entretien ne peut être expliquée par la somme des effets du *travail du sol* et de la *végétation installée*. Ceci traduit d'une part l'indépendance déjà connue de la stabilité structurale et du travail du sol, d'autre part l'insuffisance du critère végétation installée. Selon les époques de l'année ces effets peuvent s'expliquer par l'effet de la végétation associée qu'elle soit spontanée ou installée ou par celui de la végétation associée permanente, qui interviennent en partie par l'intermédiaire de l'amplitude de la variation estivale de stabilité (fig. 10). Pendant l'été 1964 les modes d'entretien ayant reçu de la matière organique à la

fin de l'hiver (engrais vert, témoin) ou en recevant (gazon) présentent une augmentation notable de stabilité par rapport au sol nu désherbé. Le fait que le témoin soit groupé avec les traitements à apport organique montre que l'enherbement spontané d'hiver réalise un apport (1) faible certes, mais non négligeable sur la stabilité.

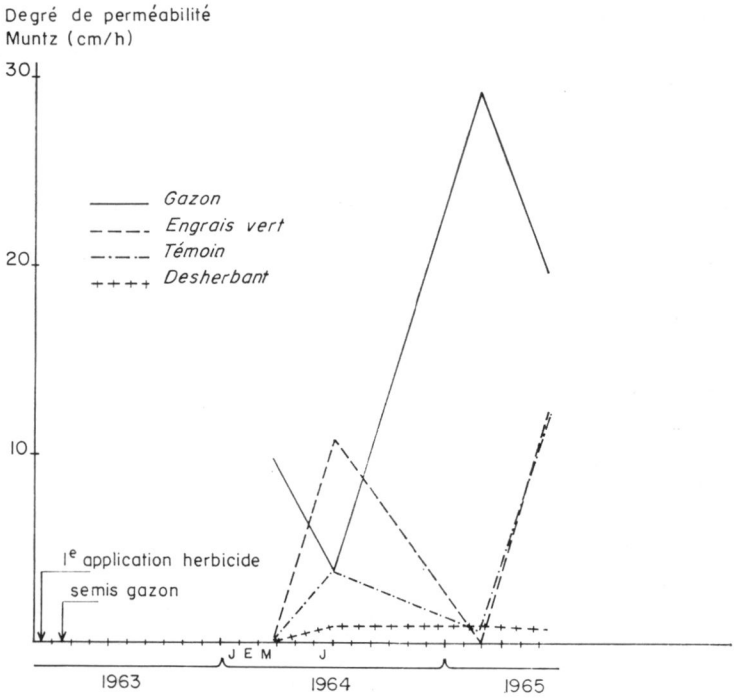


FIG. 9. — *Variations du degré de perméabilité des divers traitements dans le temps*
Moyennes des mesures réalisées en dehors du passage des roues

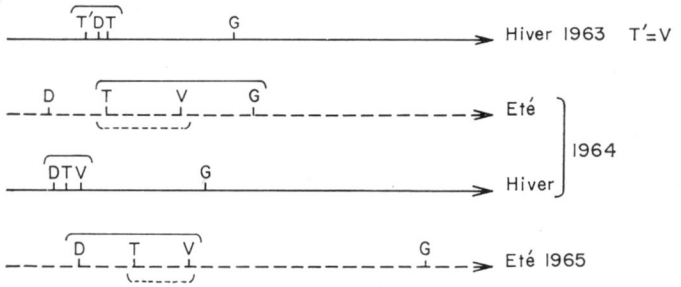


FIG. 10. — *Pourcentages d'agrégats benzènes à différentes époques*
Les accolades indiquent les regroupements significatifs

Par contre, en hiver, le supplément de matière organique consécutif à l'enfouissement de végétation du printemps précédent (engrais vert, témoin) ayant disparu, les sta-

(1) Cet apport de matière organique a été mis en évidence de façon indirecte (Cf. G. MONNIER et R. GRAS. Action d'une culture d'engrais vert sur les propriétés physiques d'un sol de verger. *Ann. agron.*, n° 5, 1965).

bilités se rapprochent de celles du désherbant sauf pour le gazon, ce qui isole la « végétation permanente » de tous les autres traitements. Notons toutefois que ce critère a été retenu en été 1965, les autres traitements se trouvant distincts du gazon par suite de l'amélioration qui se manifeste pour ce traitement d'une année sur l'autre.

Le témoin présente une augmentation estivale marquée de stabilité structurale consécutive à l'enfouissement des mauvaises herbes qui ont poussé pendant l'hiver. Les adventices poussant entre 2 travaux du sol peuvent jouer un rôle.

Le gazon (mélange paturin-trèfle blanc) fauché fréquemment, provoque par rapport au témoin une augmentation significative de la matière organique liée qui va de pair avec une amélioration importante de la stabilité structurale. Ces deux phénomènes apparaissent 8 mois seulement après le semis du gazon. Comme cette amélioration est encore visible à l'automne, il est plausible d'admettre la formation de matière organique liée relativement stable. Les constatations précédentes se vérifient en 1964. Pour la matière organique libre les différences de comportement du gazon entre les deux années tiennent à des différences de prélèvement (une partie du collet des plantes du gazon étant considéré comme racines en 1963) et à des variations à court terme de la teneur en matière organique du témoin (croissance des adventices).

Une augmentation de stabilité aussi peu de temps après l'installation d'une prairie est surprenante, compte tenu des faits constatés dans les prairies de fauche ou de pâture. Le rythme de fauche élevé pourrait, en provoquant un renouvellement plus rapide des racines du gazon, fournir un apport organique plus important qu'une prairie ordinaire. L'abandon du foin sur place constitue également une différence par rapport aux prairies.

Cette augmentation rapide de stabilité est corroborée par une constatation analogue faite dans la région parisienne sur sol de limon avec un gazon de pâturin pur (annexe I) ce qui montre que cette amélioration rapide de stabilité ne peut être attribuée au trèfle. Notons cependant qu'après 2 années d'installation en sol sableux une fétuque *Kentucky* n'a provoqué dans la vallée du Rhône aucune augmentation de stabilité.

L'engrais vert (ray-grass d'Italie) a fait en 1964 l'objet d'une étude particulière (G. Monnier et *al.*, 1965). Nous en rappellerons les conclusions principales. Les parties aériennes disparaissent assez rapidement, la décomposition des racines étant plus progressive. Au moment du semis de l'engrais vert suivant il n'y a pas de différences significatives pour la matière organique entre témoin et engrais vert. Vu la précision obtenue, on ne peut affirmer qu'il n'y a pas de gain, mais que si ce gain existe, il est faible. Rappelons que C. Baker (1937) dans l'Indiana et Proebsting (1952) en Californie ne signalent en verger aucune augmentation de la teneur en azote après des périodes de plus de 20 et 10 ans d'engrais vert d'hiver.

Au cours de la décomposition de l'engrais vert, il y a, par période, des augmentations de stabilité structurale faibles, mais significatives, imputables à l'action des produits transitoires (G. Monnier, 1965). L'augmentation d'agrégats benzène qui traduit l'action de la matière organique sur la stabilité a cessé 4 mois environ après l'enfouissement ; ce qui est à rapprocher des constatations de J. Mortensen et J. Young (1960). Dans l'été 1965 on a constaté une augmentation non significative de stabilité par rapport au témoin.

Dans les parcelles désherbées, on constate dès la première année par rapport au témoin une légère diminution de la matière organique libre qui se confirme la 2e année sans être cependant significative. Ceci peut s'expliquer par l'absence absolue de végétation, le témoin portant des mauvaises herbes entre deux façons superficielles. Il n'y a aucune diminution décelable de la matière organique liée, ce qui est normal, vu le faible taux de destruction de l'humus. Contrairement à ce qui se passe pour tous les autres modes d'entretien, on n'a pas constaté de remontée estivale de la stabilité mais une diminution significative entre les mois de novembre 1963 et 1964. Cette diminution peut être attribuée à l'absence des produits transitoires provenant de la décomposition des matières organiques fraîches (engrais vert, racines et foin du gazon, mauvaises herbes du témoin).

3° *Perméabilité et densité apparente de la couche superficielle*

L'interprétation de ces caractéristiques doit tenir compte du fait qu'elles varient dans l'espace et dans le temps :

— à un moment donné ces caractéristiques changent lorsqu'on se déplace dans l'interligne perpendiculairement à la ligne d'arbres (action des instruments et du passage des roues et des hommes ; effet protecteur des arbres...) ;

— les variations dans le temps proviennent des changements d'humidité du sol, mais également du travail du sol dans les traitements le comportant et éventuellement de l'action dégradante des pluies sur la structure.

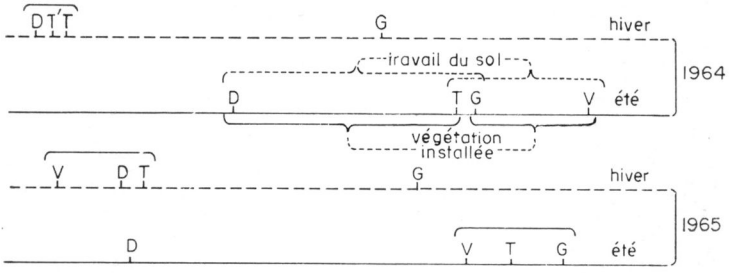


FIG. 11. — *Degrés de perméabilité. Effets moyens des modes d'entretien. Variables transformées*
Les accolades indiquent les regroupements significatifs

Les effets observés sur la perméabilité en été 1964, s'expliquent par l'addition des actions positives du travail et de la végétation artificielle ; pour les mesures de l'été 1965, l'action de l'engrais vert n'ayant pu être décelée c'est le critère « absence absolue de végétation » qui est le plus adéquat en séparant le désherbant des autres traitements. En fin d'hiver, une fois l'effet du travail du sol supprimé par l'action des pluies et la matière organique de la végétation temporaire disparue, c'est le critère végétation permanente qui devient le meilleur, puisque seul le sol sous gazon a une perméabilité notable (fig. 11).

Sol nu travaillé.

La perméabilité globale qui passe par un maximum après chaque travail du sol est à ce moment-là beaucoup plus élevée que dans les parcelles non travaillées.

Elle décroît ensuite au fur et à mesure que la quantité de précipitations et leur violence augmentent. On ne peut mesurer la perméabilité de masse que lorsque le sol est suffisamment rassis.

La perméabilité de masse quasi nulle en hiver augmente significativement pendant l'été (fig. 9). A ce moment elle est plus importante au milieu de l'interligne qu'à son extérieur. En hiver, l'infiltration de l'eau doit se faire par l'intermédiaire des fissures.

Engrais vert.

A la fin de l'hiver 1963-64, le sol étant resté plusieurs mois enherbé et sans travail la perméabilité de masse est quasi nulle. Cette absence d'amélioration de la perméabilité par repos sous végétation, peut s'expliquer par la brièveté de cette période de repos mais aussi par la confection de terre fine pour le semis de l'engrais vert Peut-être faut-il aussi faire intervenir la diminution temporaire de perméabilité suivant les débuts de l'installation d'une végétation herbacée, effet constaté en verger par H. FRITH (1952) et en laboratoire par K. BARLEY (1954).

La perméabilité subit des variations analogues à celles du témoin du fait du travail du sol et des précipitations.

En 1964, on a constaté au cours de l'été que la perméabilité de masse était 2 à 3 fois supérieure à celle du témoin, les densités apparentes n'étant pas différentes. L'explication de cette amélioration devrait faire intervenir en plus de la stabilité structurale (qui s'est aussi améliorée mais de façon moins importante) une action des débris végétaux sur la diminution de prise en masse du sol et une influence de la faune. A la fin de l'hiver il ne restait aucune trace de l'amélioration précédente.

En 1965, quoique au centre de l'interligne la perméabilité moyenne de l'engrais vert soit plus élevée que celle du témoin, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence. Les raisons de cette absence d'action nette devraient être recherchées, en partie, dans les conditions climatiques. Si elles régissent d'une façon générale l'évolution de la matière organique, elles interviennent surtout par la quantité et l'intensité des précipitations tombées entre le dernier travail du sol et la mesure.

Des précipitations violentes pourraient provoquer au bout d'un temps assez long sur un sol avec engrais vert une dégradation voisine de celle du témoin.

Engazonnement.

La variation de la perméabilité en fonction du temps (durée de l'engazonnement) dépendant de la localisation dans l'interligne, nous avons étudié séparément les variations dans la partie extérieure de l'interligne et dans le passage des roues.

A l'extérieur de l'interligne (seule position pour laquelle on dispose de toutes les mesures), les perméabilités de l'année 1965 sont supérieures à celles de 1964, ce qui indique que l'effet améliorant du gazon s'est poursuivi en 1965.

Sous le passage des roues, c'est l'inverse qui se produit, les perméabilités de 1965 étant inférieures à celles de 1964.

Hors du passage des roues le gazon, seul mode d'entretien ayant une perméabilité notable à la fin de l'hiver, a en été sensiblement la même perméabilité que le témoin, une fois le sol rassis. Sous le passage de roues la perméabilité paraît décroître après une légère remontée consécutive à l'installation du gazon, l'effet du tassement

des roues ne pouvant être compensé par l'action du pâturin qui prolifère mal dans la zone de circulation.

Désherbant.

Pour ce traitement l'amélioration de perméabilité en été est très faible (fig. 9), ce qui tendrait à montrer que l'amélioration d'été du sol nu travaillé et de l'engrais vert est en grande partie due au travail du sol. Au centre de l'interligne, la perméabilité est plus faible et la densité apparente plus élevée que sous la rangée d'arbres où le tassement dû au passage des hommes est nul, le ressuyage de l'eau meilleur (légère butte) et l'effet protecteur des arbres non négligeable.

On a constaté l'existence d'un réseau de fissures particulièrement marquées au voisinage de la rangée d'arbres. Dans cette zone l'infiltration de l'eau considérable à la fin de l'hiver 1963-64 avait fortement diminué l'été suivant, vraisemblablement à cause du colmatage par les pluies. En été des fentes de dessiccation peu profondes apparaissent au centre de l'interligne. Le réseau de fissures sur la rangée était également net au cours de l'hiver 1964-65, mais l'infiltration de l'eau y était lente. De toute façon, l'existence de ces fissures joue un rôle important pour l'infiltration de l'eau dans les parcelles désherbées où la perméabilité de masse est très faible.

Passage des roues.

La perméabilité est plus faible et la densité apparente plus élevée sous le passage des roues quel que soit le mode d'entretien. Le gazon intervient en atténuant l'effet du tassement et le désherbage total l'accentue. Cependant,cette action améliorante du gazon paraît diminuer avec le temps, la couverture par le pâturin devenant de plus en plus mauvaise, cette plante résistant mal au tassement.

Des mesures de densité apparente et de perméabilité ayant été effectuées sensiblement à la même époque on a étudié la liaison entre l'indice de percolation (cm/heure) et la densité apparente.

Sur l'ensemble des mesures la régression des indices de percolation en densité apparente, quoique significative au seuil 0,1 p. 100 montre que la densité apparente n'explique que 23 p. 100 des variations de la percolation.

L'examen du graphique montrant un groupement par mode d'entretien, nous avons calculé les régressions pour les sous-populations qui leur correspondent. Sauf pour le gazon, on obtient des régressions significatives, certaines étant significativement différentes de la régression générale (engrais vert) ou entre elles (engrais vert, désherbant). Les résultats sont dans le tableau suivant.

Population	Régression de la percolation Y en densité apparente X	Seuil de signification (%)	Fraction des variations de percolation expliquée par la liaison avec la densité apparente (%)
Engrais vert	Y = 26,39 X + 41,53	5	46
Témoin	Y = 8,71 X + 13,84	5	40
Désherbant	Y = 2,82 X + 4,78	5	38
Totale	Y = 1,28 X + 5,25	0,1	23

L'existence pour chaque traitement d'une régression significative souvent plus étroite que la relation générale tendrait à montrer que les modes d'entretien n'agissent pas sur la perméabilité uniquement par l'intermédiaire de la densité apparente.

Pour comparer l'étendue des variations induites par les modes d'entretien sur les deux tests étudiés, nous considérons les coefficients de variations (écart-type/moyenne) calculés sur l'ensemble des mesures. Ce coefficient est de 129 p. 100 pour la percolation et de 13 p. 100 seulement pour la densité apparente. Ceci conduit à penser que la percolation est un test plus sensible que la densité apparente. Signalons que H. BERNARD (1964) indique une disparité analogue dans la sensibilité de ces deux mesures.

4° *Perméabilité au centre de l'interligne dans la couche sous-jacente*

L'absence de différence entre les modes d'entretien peut provenir, soit d'une absence de sole caractérisée au moment de l'installation de l'essai, soit d'une absence d'effet améliorant sensible de traitements qui ne sont installés que depuis deux ans. Il est possible également que vu sa proximité de la surface (10-12 cm) la sole de labour se disloque assez facilement, sous l'effet de la dessiccation, par exemple.

CONCLUSION

Au point de vue méthodologique, l'étude en verger des modifications des propriétés physiques par les modes d'entretien appelle les remarques suivantes :

— il est nécessaire d'effectuer entre traitements des comparaisons homologues quant à la position des observations ou mesures dans l'interligne, puisqu'il existe fréquemment des interactions mode d'entretien-position dans l'interligne ;

— la plupart des caractéristiques étudiées variant annuellement dans le temps à cause de l'humidité, du travail concernant certaines parcelles seulement, et enfin de l'action temporaire de certains modes d'entretien, une seule mesure par an est difficilement interprétable. Il est donc souhaitable de disposer de courbes traduisant pour chaque traitement la variation dans le temps du facteur étudié ou du moins de plusieurs mesures par an ;

— l'étude du bilan de matière organique pose des problèmes particuliers, notamment à cause des variations fréquentes de la teneur en matière organique libre dues à des enfouissements de mauvaises herbes sur une faible épaisseur de sol. La séparation par densité des fractions libre et liée évite en ce sens des erreurs grossières. Le problème le plus ardu consiste à maintenir aussi constante que possible la profondeur de travail pour ne pas introduire de variations parasites de matière organique par un simple mélange de la couche sous-jacente à la couche étudiée. On conçoit que de telles variations soient assez sensibles vu la faible épaisseur de sol concernée par le travail.

Tandis que l'engazonnement provoque une amélioration sensible et durable de la perméabilité et de la stabilité structurale, l'engrais vert produit une action positive considérable sur la perméabilité et assez faible sur la stabilité ; mais il semble

que ces améliorations disparaissent avec la matière organique apportée par l'engrais vert dont la décomposition totale ne paraît guère demander plus de 6 mois.

Dans les parcelles désherbées l'absence totale de végétation suprime l'augmentation saisonnière de stabilité structurale et provoque une diminution de la perméabilité de masse qui peut être compensée en partie par une fissuration plus importante du sol.

Reçu pour publication en décembre 1965.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier particulièrement M. Lundy qui a bien voulu accepter l'installation des parcelles expérimentales dans un de ses vergers et a réalisé les travaux afférents aux divers modes d'entretien dans l'esprit qui a présidé à la conception de cet essai.

Nous remercions également M. ARNOUX, chef du service de Biométrie du C. N. R. A., dont les conseils nous ont été précieux lors de l'exécution et de l'interprétation des analyses statistiques.

ANNEXE

ACTION SUR LA STABILITÉ STRUCTURALE D'UN ENGAZONNEMENT PUR DE PATURIN ET D'UN MULCH DE PAILLE

Cet essai était établi sur un verger en sol de limon, en Brie. Avant l'installation de l'essai on a constaté que les stabilités structurales étaient identiques sur toutes les parcelles. Aussi quoique le dispositif ne comporte pas de répétition, nous avons fait une comparaison des moyennes de 5 prélèvements effectués dans chacune des parcelles 1 an 8 mois après l'installation des traitements.

	Engazonnement	Témoin	Mulch de paille
Agrégats vrais alcool.....	9,8	3,4	9,9
Agrégats vrais benzène ..	3,8	1,8	4,8
Agrégats vrais eau.....	3,6	2,1	4,4
Éléments dispersés (0-20μ)	33,7	77,4	31,4
log 10 I_s	1,74	2,08	1,68

Pour les composantes de l'indice de stabilité et l'indice lui-même, mulch et engazonnement sont significativement supérieurs au témoin, mais ne sont pas différents entre eux.

SUMMARY

FIRST RESULTS OF A TRIAL ON THE MANAGEMENT OF AN ORCHARD SOIL
I. ACTION ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE SOIL

The action of four types of soil management of an orchard soil — bare tilled soil, bare weeded soil, winter green manure (italian rye grass), permanent sward — on the organic matter and the physical properties has been studied on a loam soil.

The sod causes, in less than a year, an increase in the ratio of free and bound organic matter and a notable amelioration of the structural stability and of the permeability.

The ploughing in of the green manure is followed by an important, but temporary, increase of the permeability ; the structural stability is improved at a lesser degree. The *quasi* totality of the organic matter resulting from the green manure seems to dissolve in less than one year.

The total weeding produces a decrease in the soil permeability ; however, the presence of a network of cracks makes the penetration of the water possible.

For the bare tilled soil as well as for the green manure, there is an increase in the permeability during the summer, which is probably due to the soil management.

ZUSAMMENFASSUNG

ERSTE RESULTATE EINES VERSUCHS UBER BODENPFLEGE EINER OBSTANLAGE
I. WIRKUNG AUF DIE PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN DES BODENS

In Lehmboden wurde die Wirkung vier verschiedener Pflegearten in einer Obstanlage auf die physikalischen Eigenschaften verglichen : nackter bearbeiteter Boden, nackter Boden mit Unkrautvernichtung, Wintergründünger (welsches Weidelgras) und Dauerrasen.

Der Rasen bewirkt in weniger als einem Jahre eine Erhöhung der Rate der freien und gebundenen organischen Masse und eine fühlbare Verbesserung der Strukturstabilität und der Durchlässigkeit.

Das Einbringen des Gründüngers bewirkt eine starke, wenn auch nur vorübergehende Erhöhung der Durchlässigkeit ; die strukturale Stabilität wird etwas verbessert. Fast die gesamte organische Masse, vom Gründünger herrührend, scheint sich in weniger als einem Jahre zu zersetzen.

Als Folge totaler Unkrautbekämpfung nimmt die Durchlässigkeit der Bodenmasse ab ; ein Netz von Spalten erlaubt jedoch das Eindringen des Wassers.

Für den nackten bearbeiteten Boden erhöht sich die Durchlässigkeit während des Sommers, möglicherweise infolge der Bodenbearbeitung.

Первые результаты опытов обработки садовой почвы.

I. *Действие физических свойств почвы.*

ГРА.

РЕЗЮМЕ

На суглинковой садовой почве было проведено сравнительное определение действия на органическое вещество и физические свойства почвы, четырех способов обработки : голая окультуренная почва, голая пропалотая почва, внесение зеленого удобрения зимой (итальянский райграс), постоянное дернование.

Меньше чем через год, дернование вызывает увеличение количества свободного и связанного органического вещества и чувствительное улучшение водопроницаемости почвы и прочности ее структуры.

После запашки зеленого удобрения происходит сильное, но временное улучшение водопроницаемости; прочность структуры улучшается также, но в меньшей степени. Органическое вещество зеленого удобрения почти полностью подвергается кажущемуся разложению, в течении менее чем года.

Полная прополка вызывает ослабление водопроницаемости почвенной массы; существование сети трещин допускает, все-же, возможность проникновения влаги.

Что-же касается голой окультуренной почвы, то для нее, также как и при внесении зеленого удобрения, наблюдается улучшение водопроницаемости летом, вызванное по всей вероятности обработкой.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, **15**, 161-172.

BAKER C., 1937. Changes in total soil nitrogen under each of several cover crops after twenty-three years. *Proc. amer. Soc. hort. Sci.*, **35**, 306-307.

BARLEY K., 1954. Effect of root growth and decay on the permeability of a synthetic sandy loam. *Soil Sci.*, **78**, 205, 210.

BENOIT R., WILLITS N. et *al.*, 1962. Effect of a rye winter cover crop on soil structure. *Agron. J.*, **54**.

BERNARD H., 1964. *Untersuchungen an Pflugsohlenverdichtungen mit verschiedenen Methoden.* Rheinisch F. Wilhelm Universität, Bonn, Thèse.

BOUCHET R. J., 1964. *Évapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole* in : L'eau et la production végétale, I. N. R. A., 151-232.

DARVES-BORNOZ R., LECARPENTIER C. et *al.*, 1964. *Étude fréquentielle des besoins en eau d'irrigation en France métropolitaine.* Direction générale du Génie rural et de l'Hydraulique agricole. Ministère del l'Agriculture.

FRITH H., 1952. Some effect of no cultivation on the yields and growth of citrus trees. *Austral. J. agric. Res.*, **3**, 259-276.

HÉNIN S., MONNIER G. et *al.*, 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann. agron.*, 73-92.

KIMBALL M., WALLACE A. et *al.*, 1951. Nontillage without covercropping in a California citrus orchard. *Proc. amer. Soc. hort. Sci.*, **58**, 141-145.

KOTOV V., 1964. L'entretien du sol dans les vergers de pommiers en production de la zone « non tchernozion ». Vest Salsk Nauki nº 2, 71-80.

LISON L., 1958. *Statistique appliquée à la biologie expérimentale.* Gauthiers-Villars, Paris, 88-92.

MONNIER G., 1965. *Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.* Thèse. Faculté des Sciences, Paris.

MONNIER G., TURC L. et *al.*, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. agron.*, **13**, 55-63.

MONNIER G., et GRAS R., 1965. Action d'une culture d'engrais vert sur les propriétés physiques d'un sol de verger. *Ann. agron.*, **16**.

MORTENSEN J., YOUNG J., 1960. Effect of summer seeded green manures on soil structure and availability of nitrogen. *Ohio agric. exper. Sta Res. Bull.*, nº 865.

PISANI P., 1960. Osservazioni sul comportamento del sistemo radicale del pesco e sul contenuto idrico del terreno in rapporto alla diversa tecnico colturale. Riv. Orto frutticoltura Ital. 85 nº 1-2.

PROEBSTING E., 1952. Some effect of long continued covercropping in a California orchard. *Proc. amer. Soc. hort. Sci.*, **60**, 87-90.

PROEBSTING E., 1955. Weed sprays as a substitute for cultivation in California orchards. *Rep. 14 hort. Congr.*, 796-799.

TROCMÉ S., 1957. Fumure potassique des arbres fruitiers. *Ann. agron.*, **58**.

TURC L., 1961. Évaluation des besoins en eau, évapotranspiration potentielle. *Ann. agron.*, **12**, 13-14.

TURC L., GOBILLOT Th., 1960. *Carte de déficit annuel des précipitations.*

Ann. agron., 1965, **16** (6), 701-702.

CHRONIQUE DES LIVRES

SAUCHELLI V. — PHOSPHATES IN AGRICULTURE. — New York, Reinhold Publ. Corp. 1965, 277 p.

La première édition de cet ouvrage fut publiée 15 ans plus tôt, en 1951. Cette seconde édition tient compte des importants progrès réalisés au cours de ces dernières années dans les domaines de la technologie et l'utilisation des engrais.

L'auteur passe successivement en revue les points suivants : géologie et situation des gisements de phosphate, l'extraction des phosphates, le phosphore dans les sols et dans les plantes (photosynthèse, métabolisme, relations Mg-P), les engrais phosphatés, la fixation des phosphates par les sols, les techniques agricoles en relation avec l'utilisation des phosphates, la nutrition animale et les phosphates, les méthodes d'analyse chimique, et le commerce mondial des engrais phosphatés. Chaque chapitre est suivi d'une bibliographie.

M.L.C.

MAINIE Ph. — CALCUL ÉCONOMIQUE EN AGRICULTURE. APPLICATION DES PROGRAMMES LINÉAIRES ET DES JEUX. — Paris, Dunod, 1965, 198 p.

En parcourant cet ouvrage, on constate que les méthodes modernes, en particulier celles qui sont fondées sur la programmation linéaire, sont simples et à la portée de l'utilisateur habituel : conseiller de gestion, ingénieur commercial, administrateur de coopérative ou d'industrie agricole, comité d'expansion économique, institut public ou société privée d'études, etc.

Après un rappel succinct, destiné à montrer que ces méthodes de calcul répondent correctement aux exigences de la théorie économique, des exemples de choix dans l'entreprise et la Nation introduisent la notion de modèle linéaire. En particulier, ils font mieux saisir les hypothèses et les limitations de ces instruments.

L'auteur se place d'abord dans le cas simpliste où l'environnement de la firme est parfaitement connu et l'avenir « certain ». La réalité étant plus complexe, le problème de l'incertitude est ensuite abordé alors qu'il faut recourir à des outils appropriés à la présence de nombreux adversaires, par exemple la théorie des jeux, dont l'emploi commence à apparaître de nos jours.

(Analyse de l'Éditeur)

SEGALEN P. — LE FER DANS LES SOLS. — Paris, O. R. S. T. O. M., 1964, 150 p.

L'auteur nous livre dans cet ouvrage une mise au point bibliographique extrêmement fouillée et précise sur toutes les questions relatives au fer dans les formations superficielles de la lithosphère. On peut la diviser en 3 parties :

Dans la première (chap. I à VI, p. 3-73), sont abordés en particulier les problèmes concernant d'une part la physicochimie et la géochimie du fer, d'autre part la minéralogie des constituants ferrugineux : composition de l'écorce terrestre, sort du fer au cours de l'altération des roches primaires, étude des minéraux ferrugineux d'intérêt pédologique (silicates argileux, oxydes et hydroxydes, constituants amorphes), examen des méthodes de caractérisation minéralogique et enfin mise au point sur l'état des synthèses de laboratoire relatives aux composés ferrugineux.

La deuxième partie (chap. VII à XI, p. 74-127) est consacrée à l'étude du comportement du fer au cours de la pédogenèse : aspects physicochimiques de la mobilisation du fer ; rôle de la matière organique et de l'argile dans la dynamique de cet élément et examen des phénomènes d'immobilisation (accumulation, concrétionnement, cuirassement ...). L'exposé se termine par une analyse de l'évolution du fer dans les grands processus pédogénétiques (podzolisation, ferrallitisation ...) et par un examen de certaines propriétés du sol (couleur, structure, fertilité et toxicité ...) qui peuvent être en relation avec cet élément.

Enfin, la troisième partie (chap. XII et XIII, p. 128-140) aborde le problème chimique dans son aspect strictement analytique : techniques d'extraction et méthodes de dosage.

En définitive, excellente mise au point avec de nombreuses références, qui sera bien utile à tous les chercheurs de la Science du Sol.

G. P.

BARNOTHY M. F. — BIOLOGICAL EFFECTS OF MAGNETIC FIELDS. — New York, Plenum Press, 1964. 324 p.

Cet ouvrage traite, pour la première fois, des effets biologiques des champs magnétiques. Trente auteurs physiciens et biologistes présentent 29 notes sur leurs travaux : théoriques, expérimentaux ou bibliographiques.

La première partie rappelle les concepts de base et la théorie du magnétisme. Les deux parties suivantes exposent les résultats obtenus, *in vivo* et *in vitro*, par l'action des champs magnétiques intenses (2 000-140 000 Œ) sur les organismes vivants tandis que la quatrième analyse les effets des champs de faible intensité (0,25-10 Œ). L'ouvrage se termine par une bibliographie très riche de toutes les études sur le Biomagnétisme depuis son origine et par un répertoire des titres et travaux des auteurs.

Ce livre pourra intéresser entre autres les physiciens, les biochimistes, les généticiens, les zoologistes et les cancérologues. Les sujets traités concernent, en effet, aussi bien les techniques de production des divers champs magnétiques que leurs effets sur les animaux et les plantes.

Le matériel biologique d'expérimentation est essentiellement formé, pour les animaux, de tissus vivants de souris, de drosophiles, de planaire, d'escargots et d'oiseaux ; pour les végétaux, de bactéries, de coléoptiles d'orge et d'avoine. Le comportement de ce matériel, sous l'action des champs magnétiques, est mis en évidence par des études sur la croissance des organismes, les modifications cytologiques (hématologiques et génétiques) de leurs tissus et de leurs greffes, leur changement d'orientation et les transformations enzymatiques des produits de leur métabolisme.

Présentés, lors des 1er et 2e colloques internationaux de Biomagnétisme qui ont eu lieu aux U. S. A. en 1961 et 1963, tous ces travaux abordent « scientifiquement » un domaine nouveau. Grâce à eux, il ne semble maintenant plus possible de considérer d'un œil systématiquement dubitatif un champ de recherche soi-disant « obscur ». Tous les organismes vivants sont soumis au champ terrestre. Il est donc tout à fait logique de se demander si des variations de son intensité peuvent agir sur les végétaux et les animaux au même titre, par exemple, que le climat. Replacé sur le plan général de l'Écologie, le magnétisme terrestre n'est rien d'autre qu'un facteur du milieu qui sans doute, conditionne la vie qui s'y développe, comme le font la température, l'humidité et l'ensoleillement. Il était par conséquent aussi rationnel de créer expérimentalement des champs magnétiques variés et d'y soumettre des organismes, en serre, par des solutions nutritives artificielles, que de déterminer les exigences biologiques des végétaux. Au-delà de ces considérations méthodologiques de principe nous ne sommes pas qualifiés pour discuter de la validité des expériences présentées. Notons en tout cas, que la critique de celles-ci, parfois négatives, semble faite correctement par les auteurs eux-mêmes.

La majorité des études présentées, 22 sur 30, sont américaines. Notons aussi les expériences du réputé physicien français Y. ROCARD sur le « réflexe du sourcier », expériences qu'il a plus longuement relatées et discutées dans un petit ouvrage très original intitulé : *Le signal du sourcier* (Dunod, 1964).

C. J.

ANDREAE B. — DIE BODENFRUCHTBARKEIT IN DEN TROPEN. NUTZBARMACHUNG UND ERHALTUNG BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE ÜBERLEGUNGEN FÜR DIE ARBEIT IN ENTWICKLUNGSLÄNDERN. (LA FERTILITÉ DU SOL SOUS LES TROPIQUES). — Berlin, P. Parey, 1965, 124 p.

Nulle part au monde l'agriculture ne se trouve devant des obstacles aussi importants pour la conservation de la fertilité du sol que sous les tropiques. Les effets économiques sont d'autant plus sérieux que les pays en cause sont nettement agraires, et que leur revenu dépend, dans une mesure beaucoup plus grande que dans les pays industrialisés, de la productivité de l'agriculture.

Ce livre s'adresse à tous ceux qui s'intéressent à l'agriculture tropicale, en particulier aux techniciens envoyés pour la coopération ; il essaie de montrer comment conserver la fertilité du sol. Toutes les mesures employées dans ce sens dans la zone tempérée sont passées en revue afin de voir celles qui peuvent convenir pour les pays en voie de développement, en éliminant toutefois celles qui exigent des capitaux importants.

Ann. agron., 1965, **16** (6), 703-705.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1965

G. Barbier, J. Bilaus, Raymonde Boniface. — Contribution à l'étude de l'influence du pH sur la mobilité des ions phosphoriques du sol 603

R. Bittel. — Discussion sur les facteurs favorables à une contamination .. radioactive des végétaux cultivés 265

R. Blanchet, J. Guyot, J. Chaussidon, J. Crouzet, Colette Chaumont. — Influence prédominante des argiles illitiques sur l'alimentation potassique des plantes dans divers types de sols 177

R. Blanchet, J. Morizet, Colette Chaumont, C. Maertens. — Quelques exemples de l'utilisation d'un engrais phosphaté radioactif pour l'étude de l'alimentation phosphorique des plantes dans le sol..... 535

R. Chaminade. — Recherches sur la désorption en fonction de la température de l'ion ammonium fixé par les argiles 637

C. Duthion. — Dosage des bases échangeables à l'aide du photomètre à flamme Eppendorf 433

A. Feodoroff. — Étude expérimentale de l'infiltration de l'eau non saturante. Cas d'un sol initialement sec et d'un arrosage sans formation de plan d'eau en surface. — Première partie..... 127
— Deuxième partie 231

R. Gras. — Premiers résultats d'un essai d'entretien du sol en arboriculture fruitière. I. — Action sur les propriétés physiques du sol 663

E. Jouis, Marie-Thérèse Lecacheux. — Un terroir de transition en Seine-Maritime : le Petit-Caux 53

G. Lefèvre, G. Hiroux, M. Caillouet. — Essai d'interprépération de l'utilisation de l'azote par une prairie temporaire (Fétuque des prés). Conséquences pour la fumure..... 203

G. Lefèvre, G. Hiroux. — Contribution à l'étude de la maturation sur pied de deux variétés de pois de conserve 449

G. Long, P. Daget. — Contribution à l'étude écologique du massif de la Margeride. Observations sur la pédogenèse et le dynamisme de la végétation sur les granites 401

C. Maertens, J. Morizet, R. Studer. — Modalités d'utilisation en agronomie d'un humidimètre à ralentissement de neutrons 5

J. Mamy. — Étude des propriétés diélectriques de l'eau libre et de l'eau adsorbée 91

J. Maurice, S. Trocmé. — Observations sur le bore dans le sol et dans les plantes. I. — Notes analytiques. Dosage colorimétrique du bore total des végétaux et du bore soluble à l'eau des sols au moyen du I-I'-dianthrimide 287
II. — Influence de l'apport d'amendements calcaires sur le bore préexistant ou ajouté dans le sol..... 579

G. Monnier. — Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. — Première partie 327
— Deuxième partie 471

G. Monnier, R. Gras. — Action d'une culture d'engrais vert sur les propriétés physiques d'un sol de verger 553
J. Muller. — Observations sur les effets à long terme des fumures organiques et minérales sous climat méditerranéen. — I. Action sur les rendements ... 301
M. Obaton, H. Blachère. — L'inoculation de la Luzerne. — II. Résultats de l'expérimentation 25
Madeleine Richard, P. Gouny. — Contrôle de la salinité des sols 625

Note technique.

A. Bouat, C. Crouzet. — Notes techniques sur un appareil semi-automatique de dosage de l'azote (et de certains composés volatils) 107

Chronique des livres 119, 223, 595, 701

CONTENTS

G. Barbier, J. Bilaus, Raymonde Boniface. — Contribution to the study of the influence of the pH on the mobility of phosphoric ions in the soil. 603
R. Bittel. — Discussion of factors promoting the radioactive contamination of cultivated crops 265
R. Blanchet, J. Guyot, J. Chaussidon, J. Crouzet, Colette Chaumont. — The predominant effect of illitic clays on the potassium nutrition of plants in different soil types 177
R. Blanchet, J. Morizet, Colette Chaumont, C. Maertens. — Some exemples of the possible use of a radioactive phosphate fertilizer in the study of the nutrient capacity of soils 535
R. Chaminade. — Study on the desorption in function of the temperature of the ammonium ion fixed by clays 637
C. Duthion. — Dosage of exchangeable bases by means of the Eppendorf flamme photometer 433
A. Feodoroff. — Experimental study on the infiltration of non saturing water. Case of an initially dry soil and of an irrigation without ponding.
— First part 127
— Second part 231
R. Gras. — First results of a trial on the management of an orchard soil. I. — Action on the physical properties on the soil 663
E. Jouis, Marie-Thérèse Lecacheux. — A transitional soil in Seine-Maritime : " le Petit-Caux " 53
G. Lefèvre, G. Hiroux, M. Caillouet. — Discussion about the utilization of nitrogen fertilizer by meadow fescue. Consequences for fertilization 203
G. Lefèvre, G. Hiroux. — Contribution to the study of the maturation on the plant of two varieties of peas for canning 449
G. Long, P. Daget. — Contribution to the ecological study of the Margeride massif. Observations on the pedogenesis and plant dynamism on the granites 401
C. Maertens, J. Morizet, R. Studer. — Details of the use in agriculture of soil-moisture determination by the neutron-scattering method 5
J. Mamy. — Study of the dielectric properties of free and adsorbed water 91
J. Maurice, S. Trocmé. — Observations on boron in soils and plants. I. — Analytical notes. Colorimetric determination of total boron in plants and of water soluble boron in soils by means of I-I'-dianthrimide. 287
II. — Influence of a liming on the pre-existent or added boron in the soil. 579

G. MONNIER. — Action of the organic matter on the stability of the soil structure. — First part 327
— Second part 471
G. MONNIER, R. GRAS. — Effect of a culture of green manure on the physical properties of an orchard soil 553
J. MULLER. — Observations on the long term of organic manuring and mineral fertilizing under a mediterranean climate. I. — Effects on yield..... 301
M. OBATON, H. BLACHÈRE. — The inoculation of Lucerne. — II. Experimental results 25
Madeleine RICHARD, P. GOUNY. — Soil salinity test 625

Technical note.

A. BOUAT, C. CROUZET. — Technical notes on a semi-automatic apparatus forthe determination of nitrogen (and certain volatile compounds) 107

Book review 119, 223, 595, 701

RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Le manuscrit doit être dactylographié sur papier format 21 × 27, avec un double interligne, au recto seulement. Chaque page sera numérotée et des feuilles séparées seront utilisées pour les références bibliographiques, les tableaux, les légendes des figures et graphiques.

Au début de chaque mémoire, on indiquera : — *le titre du mémoire :* il ne devra pas comporter d'abrévations ni de formules chimiques (sauf pour les isotopes) ; — *le nom des auteurs*, précédé des initiales du prénom pour les hommes, du prénom complet pour les femmes ; — *le nom des techniciens* ayant collaboré à l'étude relatée, précédé de la mention : avec la collaboration technique de... ; — *le nom de l'établissement* dans lequel ont été effectuées les recherches et son adresse.

Les mémoires seront rédigés, autant que possible, d'après le plan ci-dessous :

a) *sommaire :* résumé suffisamment précis pour que sa lecture renseigne sur la nature du travail et son importance ; b) *introduction*, dans laquelle on indique l'objet des recherches entreprises en relation avec les travaux déjà effectués dans le domaine ; c) *techniques expérimentales et matériel utilisé*, en donnant sous une forme concise, tous les détails nécessaires pour que le lecteur puisse répéter les expériences ; d) *résultats*, à présenter de la manière la plus brève possible ; e) *discussion et conclusion ;* f) *résumé* destiné à être traduit en anglais comportant une analyse *complète* de l'article ; g) *remerciements* pour la collaboration, les fonds, les dons... ; h) *références bibliographiques*.

Les travaux originaux en anglais doivent présenter la même composition que les mémoires rédigés en français, mais ils comportent obligatoirement un résumé français très *complet* placé en tête de l'article. Les figures, graphiques, tableaux et photographies seront sous-titrés en français.

Pour les autres documents (notes, mises au point, revues, rapports, etc). l'auteur devra suivre un plan logique et le mettre en évidence par une titration appropriée.

Les références bibliographiques doivent être citées dans le texte de la manière suivante : (DUPONT et DUVAL, 1954). Lorsque la référence comporte plus de trois auteurs, seul le premier auteur sera mentionné, suivi de *et al.* A la fin de l'article, les références constituant la bibliographie doivent être citées par ordre alphabétique des noms d'auteurs, et par ordre de dates pour un même auteur.

Pour les articles : le (s) nom (s) de (s) auteur (s) suivi (s) des initiales du (des) prénom (s) ; la date de parution de l'article ; le titre de l'article (dans la langue originale pour l'allemand, l'anglais, l'italien, l'espagnol et en français dans tous les autres cas, avec indication entre parenthèses, de la langue d'origine, sauf si l'auteur étranger a sous-titré dans l'une des quatre langues mentionnées) ; le titre du périodique en abrégé, selon la World-List of Scientific Periodicals, sur le Bulletin Signalétique du C. N. R. S. ; le volume ; la première et la dernière page de l'article.

Pour les ouvrages : le nom de l'auteur avec les initiales du prénom ; la date de l'édition ; le titre complet de l'ouvrage dans la langue originale, sans abréviations (pour les langues utilisant des alphabets autres que l'alphabet latin, la traduction du titre sera donnée entre parenthèses, avec mention de la langue d'origine) ; le volume ; la première et la dernière page du paragraphe se rapportant aux résultats discutés, et, si l'on cite l'ouvrage en entier, le nombre de volumes et le nombre total de pages ; le numéro de l'édition s'il y en a plusieurs ; le nom de l'éditeur ; le lieu de l'édition. Si l'ouvrage est collectif, on indiquera en plus le nom de l'auteur du chapitre cité, le nom des rédacteurs principaux, précédé de la mention « in », le titre de l'ouvrage.

La mention « communications personnelles » ou « données non publiées », etc. doit être faite entre parenthèses. Lorsque l'auteur a relevé une référence dans une revue d' « Abstracts », le mentionner à la fin de la référence, entre parenthèses.

Les tableaux, dessins, graphiques, cartes, photographies, doivent être fournis à part. Les tableaux et figures doivent faire l'objet de deux numérotations distinctes, en chiffres arabes l'une et l'autre.

Les auteurs peuvent disposer leurs tableaux soit dans le sens de la largeur de la revue, soit dans le sens de la longueur. Dans le sens de la largeur, le total des signes et des espaces disponibles est de 100. Dans le sens de la longueur, il est de 155. Les tableaux en longueur, c'est-à-dire ceux pouvant disposer de 155 signes, ne seront admis que s'ils comprennent plus de 8 lignes de chiffres, de manière qu'une page entière de la revue ne soit pas occupée par un tableau très long et très étroit. Les graphiques ne doivent pas faire double emploi avec les tableaux.

Les légendes et les énoncés des graphiques et dessins doivent être dactylographiés sur une feuille séparée, et porter les numéros des figures.

Les graphiques, schémas, cartes, dessins d'appareils seront envoyés *à l'état de projets*, leur exécution définitive étant confiée au Bureau de Dessin de l'I. N. R. A. Seules deux réductions à l'impression sont admises : *soit* × 0,5, *soit* × 0.25.

Il est rappelé que le format utile des Annales est : 19 × 12,5 cm ; ces dimensions ne doivent pas être dépassées.

Photographies : Il est recommandé de fournir des épreuves bien contrastées sur papier blanc, et de préférence en format 9 × 12. Si les photographies doivent être associées pour constituer des planches, on adoptera les normes suivantes : 2 photos 9 × 12, 4 photos 9 × 5,5, 6 photos 5,5 × 5,5. Dans ce cas, chaque photo devra porter un numéro en chiffres arabes visible après clichage.

Les légendes des photographies doivent être dactylographiées sur feuilles séparées et porter les numéros des figures.

Correction des épreuves : les auteurs recevront deux épreuves à corriger. Les corrections « d'auteur » ne sont autorisées que sur le premier jeu d'épreuves.

Envoi du manuscrit : M. CHAMINADE, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles (Seine-et-Oise), France. On demande deux exemplaires.

Le Directeur-Gérant: M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 3-1966.

Dépôt légal: 2e trimestre 1966. N° d'impression: 526.